



Universidad  
Carlos III de Madrid

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TITULACIÓN: INGENIERO INDUSTRIAL SUPERIOR

PROYECTO FIN DE CARRERA

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE TALLADO  
POR GENERACIÓN MEDIANTE SISTEMA MQL  
(LUBRICACIÓN POR CANTIDADES MÍNIMAS)**

AUTOR: CÉSAR GALÁN MARTÍNEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO POR LA UNIVERSIDAD: M<sup>a</sup> HENAR MIGUÉLEZ GARRIDO

DIRECTOR DEL PROYECTO POR JOHN DEERE: JUAN MIGUEL ALONSO

Leganés, Junio 2010



## **RESUMEN**

En este proyecto se estudia la aplicación de técnicas de lubricación por cantidades mínimas (MQL) en el proceso de tallado por generación. La principal ventaja de este sistema reside en la reducción de la fricción entre la herramienta de corte y la pieza a mecanizar.

Con objeto de llevar a cabo este proyecto, se instaló un dispositivo MQL en una talladora diseñada para trabajar mediante aceite de corte. Con el fin de conseguir su correcto funcionamiento, en primer lugar fue necesario el acondicionamiento de dicha talladora al nuevo sistema de lubricación. Posteriormente se procedió a su automatización y puesta en marcha.

El siguiente paso consistió en la verificación de diversas piezas talladas con MQL como piezas productivas, en base a los criterios exigidos por el Sistema de Calidad de John Deere Ibérica S.A.

A partir de este momento fue posible la ejecución de un análisis comparativo del desgaste producido en la herramienta al utilizar MQL frente a aceite de corte. Como consecuencia del mismo, se puede concluir que la vida de la herramienta aumenta en algunos casos en más de un 60 %.

Por tanto, la aplicación del sistema MQL en el proceso de tallado por generación no sólo permite reducir drásticamente el consumo de aceite de corte, mejorando el entorno de trabajo, sino también unos ahorros sustanciales relacionados con los costes de herramienta.

## **ABSTRACT**

This project deals with the application of Minimum Quantity Lubrication (MQL) to hobbing process. The main advantage of this system is related to the friction reduction between tool and machined part.

In order to achieve this project, a MQL system was installed in a hobbing machine designed to work with cutting oil. To that end, firstly the hobbing machine was set up to the new lubrication system. After that it was automated.

Next, some parts machined with MQL system were verified and taken up as productive parts according to John Deere Quality System standards.

Then an experimental analysis was carried out in order to compare the hob wear using MQL versus cutting oil. As a result, it was concluded that tool life was increased in some cases more than 60 %.

Therefore when MQL system is applied to hobbing, not only oil cutting consumption will be reduce hugely, improving environmental and working conditions, but also important savings in tool cost will be achieved.



## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	3
<b>CAPÍTULO 2: LA EMPRESA JOHN DEERE.....</b>	<b>5</b>
2.1 JOHN DEERE EN EL MUNDO.....	6
2.1.1 DIVISIÓN AGRÍCOLA Y ESPACIOS VERDES.....	7
2.1.2 DIVISIÓN CONSTRUCCIÓN Y FORESTAL.....	8
2.1.3 DIVISIÓN FINANCIERA.....	8
2.2 JOHN DEERE IBÉRICA.....	8
2.2.1 HISTORIA.....	8
2.2.2 JOHN DEERE IBÉRICA EN LA ACTUALIDAD.....	10
2.2.3 PRODUCTOS.....	11
2.2.4 ORGANIGRAMA GENERAL.....	13
2.2.5 POLÍTICA DE CALIDAD Y MEDIO AMBIENTE.....	15
2.3 CONCLUSIONES.....	16
<b>CAPÍTULO 3: MECANIZADO DE EJES EN LA CÉLULA 82.....</b>	<b>17</b>
3.1 INTRODUCCIÓN.....	18
3.2 LAYOUT DE LA CÉLULA 82.....	21
3.3 COMPOSICIÓN DE LA CÉLULA 82.....	22
3.4 PIEZAS MECANIZADAS EN LA CÉLULA 82.....	28
3.5 CONCLUSIONES.....	30
<b>CAPÍTULO 4: TALLADO DE ENGRANAJES.....</b>	<b>31</b>
4.1 DESCRIPCIÓN Y TIPOS DE TALLADO.....	32
4.2 TALLADO POR GENERACIÓN.....	32
4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL TALLADO POR GENERACIÓN.....	33
4.2.2 PARÁMETROS Y TIEMPOS DE CORTE.....	36



4.2.3 GEOMETRÍA DE CORTE.....	39
4.2.4 TIPOS DE DESGASTE EN FRESAS MADRE.....	44
4.2.4.1 DESGASTE TIPO CRÁTER.....	45
4.2.4.2 DESGASTE TIPO ABRASIVO.....	48
4.2.5 SHIFTING Y AFILADO DE LA FRESA MADRE.....	51
4.3 CONCLUSIONES.....	54
<b>CAPÍTULO 5: LUBRICACIÓN Y REFRIGERACIÓN.....</b>	<b>56</b>
5.1 INTRODUCCIÓN.....	57
5.2 FLUIDOS DE CORTE.....	57
5.2.1 TIPOS DE FLUIDOS DE CORTE.....	58
5.2.1.1 ACEITES DE CORTE.....	58
5.2.1.2 TALADRINAS.....	59
5.2.2 FUNCIONES DE LOS FLUIDOS DE CORTE.....	59
5.2.3 ELECCIÓN DE LOS FLUIDOS DE CORTE.....	60
5.2.4 INCONVENIENTES DEL USO DE LOS FLUIDOS DE CORTE.....	61
5.2.5 GESTIÓN DE LOS FLUIDOS DE CORTE.....	62
5.3 ALTERNATIVAS A LA UTILIZACIÓN DEL FLUIDO DE CORTE	
CONVENCIONAL.....	63
5.3.1 MECANIZADO EN SECO.....	63
5.3.2 MECANIZADO CON MÍNIMA CANTIDAD DE LUBRICANTE (MQL).....	64
5.4 MQL: SISTEMA DE LUBRICACIÓN POR CANTIDADES MÍNIMAS.....	66
5.4.1 VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL SISTEMA MQL FRENTE AL	
FLUIDO DE CORTE CONVENCIONAL.....	67
5.4.2 LUBRICACIÓN POR CANTIDADES MÍNIMAS INTERNA Y EXTERNA.....	69
5.4.3 LUBRICANTES PARA MQL.....	72
5.5 SISTEMA LUBRILEAN BASIC.....	72
5.6 CONCLUSIONES.....	77
<b>CAPÍTULO 6: TALLADORA LIEBHERR LC-502.....</b>	<b>79</b>
6.1 INTRODUCCIÓN.....	80
6.2 DATOS TÉCNICOS DE LA TALLADORA LIEBHERR LC-502.....	81
6.3 SISTEMA DE LUBRICACIÓN Y REFRIGERACIÓN DE LA TALLADORA	
LIEBHERR LC-502.....	83



6.4 CONCLUSIONES.....	88
-----------------------	----

## **CAPÍTULO 7: IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA MQL EN LA TALLADORA**

<b>LIEBHERR LC-502.....</b>	<b>89</b>
7.1 INTRODUCCIÓN.....	90
7.2 INSTALACIÓN DEL FILTRO EXTRACTOR.....	90
7.3 INSTALACIÓN DEL SISTEMA MQL.....	93
7.3.1 PRIMERA FASE: POSICIONAMIENTO Y MONTAJE DE LAS BOQUILLAS.....	93
7.3.2 SEGUNDA FASE: POSICIONAMIENTO Y MONTAJE DEL SISTEMA LUBRILEAN BASIC.....	94
7.3.3 TERCERA FASE: AUTOMATIZACIÓN Y PROGRAMACIÓN DEL MQL.....	95
7.4 PRUEBAS A REALIZAR PARA LA IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA MQL.....	98
7.4.1 PIEZAS SELECCIONADAS.....	98
7.4.2 FRESAS MADRE UTILIZADAS.....	100
7.4.3 PRUEBAS Y DESGASTES DE LAS FRESAS.....	102
7.5 IMPLANTACIÓN DEFINITIVA DEL SISTEMA MQL.....	106
7.6 CONCLUSIONES.....	109

## **CAPÍTULO 8: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....110**

8.1 INTRODUCCIÓN.....	111
8.2 TEMPERATURA DE LAS PIEZAS Y GRÁFICOS DE TALLADO.....	111
8.3 ANÁLISIS DE LOS DESGASTES DE LAS FRESAS MADRE.....	115
8.3.1 FRESA N-35-10-15381.....	117
8.3.2 FRESA N-35-10-15305.....	128
8.3.3 FRESA N-35-10-15444.....	139
8.3.4 FRESA N-35-11-15333.....	148
8.4 CONCLUSIONES.....	157

## **CAPÍTULO 9: ESTUDIO ECONÓMICO Y CONCLUSIONES.....159**

9.1 ESTUDIO ECONÓMICO.....	160
9.1.1 COSTES DE INVERSIÓN.....	160
9.1.2 AHORROS.....	161
9.1.2.1 AHORRO EN ADQUISICIÓN, AFILADO Y RECUBRIMIENTO DE	



LAS FRESAS.....	162
9.1.2.2 AHORRO EN EL CAMBIO DE HERRAMIENTA.....	171
9.1.2.3 AHORRO EN ACEITE.....	173
9.1.2.4 AHORRO TOTAL.....	175
9.1.3 AMORTIZACIÓN DEL CAPITAL.....	176
9.1.4 AHORROS EN AMPLIACIÓN DE PROYECTO.....	176
9.1.5 RESUMEN.....	180
9.2 CONCLUSIONES.....	181
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>184</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>187</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>194</b>





## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Localización de los centros productivos John Deere.....	7
Figura 2.2: Vista aérea de la factoría de Getafe.....	10
Figura 2.3: Cajas pesadas de transmisión producidas en John Deere Ibérica.....	11
Figura 2.4: Cajas ligeras de transmisión producidas en John Deere Ibérica.....	12
Figura 2.5: Engranajes mecanizados en John Deere Ibérica.....	12
Figura 2.6: Mandos finales y enganches tripuntales producidos en John Deere Ibérica.....	13
Figura 2.7: Organigrama general.....	14
Figura 3.1: Engranajes de motor.....	18
Figura 3.2: Ejes de transmisión.....	19
Figura 3.3: Flujo seguido por una pieza en la célula 82.....	20
Figura 3.4: Evolución de las piezas en la célula 82 desde la entrada hasta la salida.....	20
Figura 3.5: Layout de la célula 82.....	21
Figura 3.6: Imagen de la célula 82.....	21
Figura 3.7: Refrentadora-punteadora.....	22
Figura 3.8: Piezas refrentadas y punteadas.....	22
Figura 3.9: Torno CNC.....	23
Figura 3.10: Torno CNC y su portaherramientas.....	23
Figura 3.11: Talladora de ejes CNC.....	24
Figura 3.12: Detalle de la talladora y su portaherramientas.....	24
Figura 3.13: Rebarbadora.....	25
Figura 3.14: Detalle de la afeitadora.....	25
Figura 3.15: Centro de mecanizado CNC.....	26
Figura 3.16: Detalle del centro de mecanizado.....	26
Figura 3.17: Piezas a la salida de la célula 82.....	26
Figura 4.1: Esquema de tallado por generación.....	33
Figura 4.2: Fresa madre.....	34
Figura 4.3: Movimiento coordinado y continuo entre la fresa madre y el engranaje.....	34
Figura 4.4: Desarrollo de la forma de los dientes de un engranaje por los dientes de corte de una fresa madre.....	35
Figura 4.5: Secuencia del desarrollo completo del tallado por medio de la fresa madre.....	35



Figura 4.6: Ángulo de montaje de la fresa madre para dentado recto.....	36
Figura 4.7: Ángulo de montaje de la fresa madre para dentado helicoidal.....	36
Figura 4.8: Fresado por generación convencional.....	38
Figura 4.9: Fresado por generación en trepado.....	38
Figura 4.10: Detalle del recorrido de la fresa madre.....	39
Figura 4.11: Esquema de los elementos de corte principales en una fresa madre...	40
Figura 4.12: Esquema de la geometría de corte de una fresa madre.....	41
Figura 4.13: Ángulo de desprendimiento positivo.....	42
Figura 4.14: Ángulo de desprendimiento negativo.....	42
Figura 4.15: Reacción de la fuerza de corte en el caso de una fresa madre con ángulo de desprendimiento positivo.....	43
Figura 4.16: Reacción de la fuerza de corte en el caso de una fresa madre con ángulo de desprendimiento negativo.....	43
Figura 4.17: Esquema del proceso de arranque de viruta por un diente de la fresa madre.....	45
Figura 4.18: Desgaste de cráter sobre la superficie de incidencia de un diente de la fresa madre.....	47
Figura 4.19: Representación de los metros de material cortado (K) en función de la velocidad de corte de la fresa madre ( $V_c$ ).....	48
Figura 4.20: Representación del desgaste tipo abrasivo (W) en función de los metros de engranaje mecanizados por la fresa madre (K).....	49
Figura 4.21: Mellado en el recubrimiento del filo de corte de un diente de la fresa madre.....	50
Figura 4.22: Desgaste crítico de fresas madre en función del módulo del diente a tallar.....	51
Figura 4.23: Shifting en dirección opuesta.....	52
Figura 4.24: Shifting en la misma dirección.....	52
Figura 4.25: Esquemas del funcionamiento de una muela afiladora de fresas madre.....	53
Figura 5.1: Diseño de un sistema de lubricación por cantidades mínimas interno de un canal.....	70
Figura 5.2: Diseño de un sistema de lubricación por cantidades mínimas externo.....	71
Figura 5.3: Atomización en gotas microscópicas por medio de una boquilla de tipo coaxial.....	71
Figura 5.4: Boquillas utilizadas en el dispositivo Lubrilean Basic.....	73
Figura 5.5: Planos del dispositivo Lubrilean Basic.....	74



Figura 5.6: Esquema hidráulico del dispositivo Lubrilean Basic.....	75
Figura 6.1: Imagen de la talladora Liebherr LC 502.....	80
Figura 6.2: Esquema de la talladora y sus ejes.....	82
Figura 6.3: Diagrama de consumo de aceite de corte nº 1.....	84
Figura 6.4: Diagrama de consumo de aceite de corte nº 2.....	85
Figura 6.5: Imagen de la talladora trabajando con aceite de corte.....	86
Figura 7.1: Instalación del soporte del filtro.....	91
Figura 7.2: Instalación del filtro sobre el soporte.....	91
Figura 7.3: Conexiones entre filtro y talladora.....	92
Figura 7.4: Vallas de protección para el filtro.....	92
Figura 7.5: Boquillas, rótulas y pieza de sujeción antes de su montaje.....	94
Figura 7.6: Boquillas conectadas a las rótulas y a la pieza de sujeción.....	94
Figura 7.7: Guía sobre la que se decidió instalar las boquillas.....	94
Figura 7.8: Boquillas instaladas en el interior de la talladora.....	94
Figura 7.9: Dispositivo Lubrilean Basic instalado en el bastidor de la talladora.....	95
Figura 7.10: Selector instalado en el panel de control numérico de la talladora para trabajar con aceite de corte o con MQL.....	96
Figura 7.11: Acumulación de viruta en la talladora al utilizar MQL.....	97
Figura 7.12: Hoja de datos mecánicos de la pieza CE 18223.....	98
Figura 7.13: Hoja de datos mecánicos de la pieza CE 20126.....	99
Figura 7.14: Eje CE 18223 a la entrada y a la salida de la talladora Liebherr LC-502.....	100
Figura 7.15: Eje CE 20126 a la entrada y a la salida de la talladora Liebherr LC-502.....	100
Figura 7.16: Fresa N-35-10-15381.....	101
Figura 7.17: Fresa N-35-10-15305.....	101
Figura 7.18: Fresa N-35-10-15444.....	101
Figura 7.19: Fresa N-35-11-15333.....	101
Figura 7.20: Micrómetro de platillos para medir el espesor cordal entre varios dientes.....	103
Figura 7.21: Máquina Klingelnberg para el control de engranajes por rodadura...	103
Figura 7.22: Medición de la temperatura superficial de la pieza CE 18223 con termómetro de contacto.....	104
Figura 7.23: Microscopio utilizado (parte izquierda) en el análisis de los desgastes de las fresas madre con la cámara conectada en el visor izquierdo para transmitir las imágenes al ordenador (parte derecha).....	105



Figura 8.1: Gráficos de perfil de evolvente y línea de flanco de la pieza CE-18223.....	113
Figura 8.2: Gráficos de salto de rodadura de la pieza CE-18223.....	114
Figura 8.3: Esquema de los principales desgastes que tienen lugar en un diente de una fresa madre.....	116
Figura 8.4: Comparación de los desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-10-15381 al utilizar aceite de corte y MQL....	117
Figura 8.5: Desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-10-15381 tras tallar 280 piezas con aceite de corte.....	118
Figura 8.6: Desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-10-15381 tras tallar 280 piezas con MQL.....	119
Figura 8.7: Imágenes de la zona central de la superficie de incidencia de dos dientes que presentaban desgaste abrasivo tras tallar 280 piezas con aceite de corte.....	119
Figura 8.8: Imágenes de la zona central de la superficie de incidencia de dos dientes que presentaban desgaste abrasivo tras tallar 280 piezas con MQL.....	120
Figura 8.9: Imágenes de la esquina izquierda y de la zona central de la superficie de incidencia de los dos dientes que presentaban mayores mellados tras tallar 280 piezas con aceite de corte.....	120
Figura 8.10: Imágenes de la zona central y de las esquinas de la superficie de incidencia de los dos dientes que presentaban mayores mellados tras tallar 280 piezas con MQL.....	121
Figura 8.11: Imágenes de la zona central de la superficie de incidencia de dos dientes que presentaban desgaste abrasivo tras tallar 350 piezas con MQL.....	122
Figura 8.12: Imágenes de la fresa N-35-10-15381 después de tallar 280 piezas con aceite de corte.....	122
Figura 8.13: Imágenes de la fresa N-35-10-15381 después de tallar 280 piezas con MQL.....	123
Figura 8.14: Comparación del número de dientes de cada fresa con desgaste de cráter después de tallar 280 piezas con aceite de corte y con MQL.....	123
Figura 8.15: Imágenes de algunos de los numerosos dientes afectados con desgaste de cráter tras tallar 280 piezas con aceite de corte.....	125
Figura 8.16: Imágenes de los dos únicos dientes en los que apareció desgaste de cráter tras tallar 280 piezas con MQL.....	125



Figura 8.17: Comparación de los desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-10-15305 al utilizar aceite de corte y MQL.....	128
Figura 8.18: Desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-10-15305 tras tallar 280 piezas con aceite de corte.....	129
Figura 8.19: Desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-10-15305 tras tallar 280 piezas con MQL.....	130
Figura 8.20: Imágenes de los desgastes abrasivos aparecidos en la superficie de incidencia de dos dientes tras tallar 280 piezas con aceite de corte.....	131
Figura 8.21: Imágenes de los desgastes abrasivos aparecidos en la superficie de incidencia de dos dientes tras tallar 280 piezas con MQL.....	131
Figura 8.22: Imágenes de algunos desgastes abrasivos producidos en los flancos laterales de diferentes dientes tras tallar 280 piezas con aceite de corte.....	132
Figura 8.23: Imágenes de algunos desgastes abrasivos producidos en los flancos laterales de diferentes dientes tras tallar 280 piezas con MQL.....	133
Figura 8.24: Imágenes de la parte central y de los flancos laterales de los dos dientes que presentaban mayores mellados en sus esquinas tras tallar 280 piezas con aceite de corte.....	134
Figura 8.25: Imágenes de la parte central y del flanco lateral derecho de los dos dientes en los que se observaron mayores mellados de esquina tras tallar 280 piezas con MQL.....	135
Figura 8.26: Imágenes de la fresa N-35-10-15305 tras tallar 280 piezas con aceite de corte.....	135
Figura 8.27: Imágenes de la fresa N-35-10-15305 tras tallar 280 piezas con MQL.....	136
Figura 8.28: Imágenes de los desgastes producidos en la cara de corte de dos dientes tras tallar 280 piezas con aceite de corte.....	136
Figura 8.29: Imágenes de los desgastes producidos en la cara de corte de dos dientes tras tallar 280 piezas con MQL.....	137
Figura 8.30: Comparación de los desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-10-15444 al utilizar aceite de corte y MQL.....	139
Figura 8.31: Desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-10-15444 tras tallar 300 piezas con aceite de corte.....	140
Figura 8.32: Desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-10-15444 tras tallar 300 piezas con MQL.....	140



Figura 8.33: Imágenes de la zona central de la superficie de incidencia de dos dientes que presentaban desgaste abrasivo tras tallar 300 piezas con aceite de corte.....	141
Figura 8.34: Imágenes de la zona central de la superficie de incidencia de dos dientes que presentaban desgaste abrasivo tras tallar 300 piezas con MQL.....	141
Figura 8.35: Imágenes de la zona central y de esquina de la superficie de incidencia de los dientes que presentaban mayores mellados tras tallar 300 piezas con aceite de corte.....	142
Figura 8.36: Imágenes de la zona central y de esquina de la superficie de incidencia de los dos dientes que presentaban mayores mellados tras tallar 300 piezas con MQL.....	143
Figura 8.37: Imágenes de la fresa N-35-10-15444 tras tallar 300 piezas con aceite de corte.....	144
Figura 8.38: Imágenes de la fresa N-35-10-15444 tras tallar 300 piezas con MQL.....	144
Figura 8.39: Comparación del número de dientes de cada fresa con desgaste de cráter tras tallar 300 piezas con aceite de corte y con MQL.....	145
Figura 8.40: Imágenes de algunos de los numerosos dientes afectados con desgaste de cráter tras tallar 300 piezas con aceite de corte.....	146
Figura 8.41: Imágenes de los dos únicos dientes en los que se observaron desgastes en la cara de corte tras tallar 300 piezas con MQL.....	146
Figura 8.42: Comparación de los desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-11-15333 al utilizar aceite de corte y MQL.....	148
Figura 8.43: Desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-11-15333 tras tallar 300 piezas con aceite de corte.....	149
Figura 8.44: Desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-11-15333 tras tallar 300 piezas con MQL.....	150
Figura 8.45: Imágenes de la superficie de incidencia de dos dientes que presentaban desgaste abrasivo tras haber tallado 300 piezas con aceite de corte.....	150
Figura 8.46: Imágenes de la superficie de incidencia de dos dientes que presentaban desgaste abrasivo tras haber tallado 300 piezas con MQL.....	151
Figura 8.47: Imágenes del flanco lateral derecho de dos dientes que presentaban desgaste abrasivo tras haber tallado 300 piezas con aceite de corte.....	151
Figura 8.48: Imágenes del flanco lateral derecho de dos dientes que presentaban desgaste abrasivo tras haber tallado 300 piezas con MQL.....	151



Figura 8.49: Imágenes de la superficie de incidencia de los cuatro dientes que presentaban mayores mellados después de tallar 300 piezas con aceite de corte.....	152
Figura 8.50: Imágenes de la superficie de incidencia de los dos dientes que presentaban mayores mellados después de tallar 300 piezas con MQL.....	153
Figura 8.51: Imágenes de la fresa N-35-11-15333 después de tallar 300 piezas con aceite de corte.....	153
Figura 8.52: Imágenes de la fresa N-35-11-15333 después de tallar 300 piezas con MQL.....	153
Figura 8.53: Imágenes de la cara de corte de los cuatro dientes que presentaban mayor desgaste después de tallar 300 piezas con aceite de corte.....	154
Figura 8.54: Imágenes de la cara de corte de los dos únicos dientes que presentaban desgaste después de tallar 300 piezas con MQL.....	155
Figura B.1: Esquema del filtro Donaldson Dryflo DMC-MMC.....	196
Figura B.2: Esquema de funcionamiento del filtro Donaldson Dryflo DMC-MMC....	196



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Tipos de piezas mecanizadas en la célula 82 junto a sus horas estándar correspondientes.....	28
Tabla 3.2: Volumen de producción anual previsto para cada tipo de pieza mecanizada en la célula 82.....	29
Tabla 5.1: Propiedades del aceite Ultracut Bio 500 SP.....	76
Tabla 6.1: Propiedades del aceite Cut-Max BR212.....	83
Tabla 7.1: Pauta de automantenimiento del sistema MQL.....	108
Tabla 8.1: Temperaturas máximas registradas en las piezas CE-20126 y CE-18223 con aceite de corte y con MQL.....	111
Tabla 8.2: Resumen del aumento de vida alcanzado en las fresas madre.....	158
Tabla 9.1: Costes de los dispositivos instalados en la talladora.....	160
Tabla 9.2: Costes de mano de obra.....	161
Tabla 9.3: Volumen de producción anual de la talladora Liebherr LC-502.....	162
Tabla 9.4: Vida de las fresas analizadas durante las pruebas.....	162
Tabla 9.5: Ahorro en herramienta obtenido en las 4 fresas madre analizadas.....	170
Tabla 9.6: Ahorro obtenido en el cambio de herramienta de las 4 fresas madre analizadas.....	173
Tabla 9.7: Ahorro total obtenido en las 4 fresas madre analizadas.....	175
Tabla 9.8: Tabla resumen del estudio económico.....	180





## *CAPÍTULO 1:*

## *INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS*



## **1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

El proyecto fin de carrera "Optimización del proceso de tallado por generación mediante sistema MQL (Lubricación por Cantidades Mínimas)", nace como una idea surgida dentro de John Deere Ibérica S.A. para implantar una nueva tecnología de lubricación en el tallado de engranajes.

En John Deere Ibérica S.A. existen talladoras de ejes y engranajes que trabajan con dos tecnologías diferentes en cuanto al sistema de lubricación y refrigeración utilizado: tallado con aceite de corte y tallado en seco.

El sistema MQL presenta una tecnología intermedia entre ambas, basada en la pulverización de una mínima cantidad de lubricante en forma de aerosol sobre la zona de corte.

Aunque esta técnica de lubricación se utiliza ya en numerosos procesos de mecanizado en industrias de todo el mundo, este proyecto es totalmente innovador dado que ni se conocen aplicaciones de sistemas MQL en el proceso de tallado por generación, ni existen talladoras diseñadas para trabajar con dichos sistemas.

### **1.2 OBJETIVOS**

Los principales objetivos de este proyecto son:

- Reducir el consumo de aceite de corte, obteniendo beneficios económicos y medioambientales.
- Realizar las instalaciones y modificaciones necesarias en una talladora diseñada para trabajar con aceite de corte, de manera que pueda funcionar con un dispositivo MQL.
- Optimizar los parámetros de funcionamiento (caudal de aceite, caudal de aire, presión de trabajo, orientación de las boquillas, etc.) del equipo de



lubricación por cantidades mínimas, para conseguir aumentar la vida de la herramienta.

- Realizar un análisis de los desgastes producidos en diferentes fresas madre al utilizar el sistema MQL, comparando estos resultados con los desgastes producidos al utilizar aceite de corte.

Además de contemplar los objetivos principales anteriormente enunciados, este proyecto recoge una serie de objetivos personales que se encuentran implícitos en la consecución del mismo y que se muestran a continuación:

- Ampliar los conocimientos teóricos adquiridos en la universidad sobre el proceso de tallado por generación, así como adquirir conocimientos prácticos sobre las distintas tecnologías utilizadas en este proceso.
- Conocer de cerca las diferentes técnicas de lubricación y refrigeración utilizadas en los principales procesos de mecanizado.
- Trabajar a nivel de taller, tratando diariamente con operarios.
- Adquirir una visión global del funcionamiento de una empresa multinacional dedicada a la industria del mecanizado, en la que los diferentes departamentos que la integran se encuentran íntimamente relacionados.

### 1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento se puede dividir en cinco bloques principales, tal y como se muestra a continuación.

El primer bloque se corresponde con los capítulos 2 y 3. En el Capítulo 2 se da una visión general de la compañía Deere & Company, así como de su filial española, John Deere Ibérica. En el Capítulo 3 se realiza una descripción de la célula 82, perteneciente a la Minifábrica de Ejes y Engranajes de John Deere Ibérica, dado que es en la talladora de ejes de esta célula donde se lleva a cabo el presente proyecto.



En el segundo bloque compuesto por los capítulos 4 y 5, se realiza una introducción a las tecnologías sobre las que se centra el proyecto. En el Capítulo 4 se describe el proceso de tallado por generación, utilizado para tallar engranajes, haciendo especial énfasis en los mecanismos de desgaste de la herramienta (la fresa madre). En el Capítulo 5 se da una visión general de las diferentes tecnologías de lubricación y refrigeración empleadas en el mecanizado, introduciendo las principales características de los sistemas de lubricación por cantidades mínimas.

El tercer bloque se corresponde con el Capítulo 6. En este capítulo se describen las principales características técnicas, así como el sistema de lubricación y refrigeración original de la talladora en la cual se instaló el dispositivo MQL.

El cuarto bloque está formado por los capítulos 7 y 8. En el capítulo 7 se muestran cuales fueron los pasos a seguir para lograr la instalación y el correcto funcionamiento del sistema MQL en la talladora. En el capítulo 8 se analizan los resultados obtenidos en las pruebas que se llevaron a cabo con el fin de comprobar la eficacia de este sistema de lubricación.

En el quinto bloque, correspondiente al capítulo 9, se realiza un estudio económico y se presentan unas breves conclusiones del proyecto, incluyendo futuras líneas para su ampliación.



## *CAPÍTULO 2:*

### *LA EMPRESA JOHN DEERE*



## **2. LA EMPRESA JOHN DEERE**

### **2.1 JOHN DEERE EN EL MUNDO**

John Deere es el primer fabricante a nivel mundial de maquinaria agrícola y de equipos para la mecanización de espacios verdes, así como uno de los principales productores de maquinaria para construcción y para explotaciones forestales. Las actividades de la compañía incluyen desde la fabricación y la comercialización de motores y transmisiones, hasta los servicios financieros, seguros sanitarios y la división de nuevas tecnologías.

La empresa fue fundada en Illinois (EEUU) en el año 1837, dedicándose en su origen a la fabricación de aperos para la agricultura, y no fue hasta 1914 cuando Deere & Company lanzó su primer tractor. Su expansión internacional se inicia hacia 1950, lo que permitió que esta compañía se convirtiese en el mayor fabricante mundial de maquinaria agrícola, condición que ha mantenido desde entonces.

Actualmente, Deere & Company (comúnmente conocido como John Deere) se encuentra presente en todo el mundo, proporcionando empleo directo a 56.000 personas. Dispone de una red de más de 60 fábricas y centros de producción, y más de 5.000 concesionarios para dar servicio a sus clientes. Las acciones de Deere & Company cotizan regularmente en los mercados de Nueva York, Chicago y Frankfurt.

Las numerosas fábricas y centros de producción de esta compañía se encuentran localizados en EEUU, Canadá, Argentina, Brasil, México, China, India, Francia, Alemania, Finlandia, España, Rusia, Nueva Zelanda, Australia y Sudáfrica, tal y como muestra la Figura 2.1.



**Figura 2.1:** Localización de los centros productivos John Deere

John Deere es considerado uno de los pioneros en la industria de la agricultura. Sin embargo, a veces se pasa por alto que es una empresa ampliamente diversificada, estando organizada principalmente en tres segmentos de negocio:

División Agrícola y Espacios Verdes (Ag & Turf)

División Construcción y Forestal (Construction & Forestry)

División Financiera (John Deere Credit)

### **2.1.1 DIVISIÓN AGRÍCOLA Y ESPACIOS VERDES**

Esta división estratégica de Deere & Company, es conocida como Ag & Turf, y supone más del 70% del volumen de ventas de la compañía.

Sus productos principales se dividen en dos grandes grupos. Por un lado los tractores, cosechadoras, empacadoras, sembradoras, segadoras, etc. dentro de la sección dedicada a la maquinaria agrícola; y la maquinaria para mantenimiento de áreas verdes y campos de golf, como productos para viveros, cortacéspedes, etc. dentro de la sección de espacios verdes.



### 2.1.2 DIVISIÓN CONSTRUCCIÓN Y FORESTAL

Esta división, también conocida como C & F (Construction & Forestry), supone actualmente en torno a un 15% del volumen de ventas de Deere & Company. Sus productos son principalmente maquinaria para la construcción y obras públicas así como para la industria forestal.

### 2.1.3 DIVISIÓN FINANCIERA

Esta división, también conocida como JDC (John Deere Credit), está dedicada a servicios de financiación de equipos para clientes, de seguros de cosecha y de energía eólica.

## 2.2 JOHN DEERE IBÉRICA

### 2.2.1 HISTORIA

La historia de John Deere Ibérica S.A. comienza en la segunda mitad de los años 50, cuando Deere & Company inicia su expansión por el continente europeo con la adquisición de la marca alemana Lanz.

Entre las instalaciones que adquirió esta compañía, se encontraba la fábrica de tractores que Lanz Ibérica tenía situada en el madrileño municipio de Getafe. Dicha fábrica, en la que desde 1956 se producían los famosos tractores Lanz Bulldog, se destinó a la producción de tractores para el mercado español y así, en 1963, salió de la cadena de montaje el primer tractor John Deere fabricado en España, una unidad del modelo JD 505.

Con el paso de los años, la fábrica de Getafe fue produciendo distintas series de tractores John Deere: la Serie 10, la Serie 20 (1969), la Serie 30 (1973), la Serie 35 (1975), la Serie 40 (1980) y la Serie 50 (1987).

Los productos de la marca John Deere demostraron día a día su rendimiento y calidad en los campos de la agricultura española, y ya en el año 1972 esta marca encabezaba las listas del mercado de cosechadoras y empacadoras. Dos años más tarde el liderazgo aumentaba, y John Deere encabezaba por primera vez el





mercado de tractores de ruedas en España, posición de líder que ha mantenido año tras año desde entonces.

En el año 1987 se diversifica la actividad de la fábrica y, además de tractores, se empiezan a producir componentes para las demás cadenas de montaje de Deere & Company.

Con el objetivo de aprovechar las oportunidades que brinda la apertura de los mercados europeos, en el año 1992 se decide centralizar la producción de los tractores de la nueva Serie 6000 en la factoría de Mannheim (Alemania). De esta forma, dos años más tarde sale de la fábrica de Getafe el último tractor que hasta hoy se ha producido en sus instalaciones.

Desde ese momento, la unidad de Getafe se especializa en la fabricación de componentes para el resto de las fábricas de Deere & Company en el mundo. Gracias a la excelente calidad de sus productos, la fábrica de Getafe ha adquirido una posición de especial importancia en el organigrama industrial de Deere & Company, y hoy en día miles de máquinas vendidas en todo el mundo, llevan componentes salidos de sus líneas de producción.

En el año 1988 la actividad de la unidad comercial de John Deere Ibérica S.A., se diversifica mediante la creación de la nueva división de Espacios Verdes. La responsabilidad de esta nueva división, en un principio destinada a comercializar productos para el cuidado de jardines, se amplía en el año 1992 cuando se introducen en España los productos John Deere para el cuidado de campos de golf.

Otro momento clave de la compañía en España fue la apertura del Centro de Formación de John Deere en Toledo en el año 1989. A él asisten más de 1.000 personas al año a los distintos programas de formación que se preparan tanto para empleados y concesionarios, como para clientes y estudiantes de escuelas agrarias.

En 1994 John Deere Ibérica S.A., que hasta entonces operaba sólo en España, extiende su área de responsabilidad para productos agrícolas al territorio portugués. Desde entonces la penetración de John Deere en los distintos sectores del mercado portugués en los que participa, ha crecido continuamente gracias al esfuerzo y dedicación de los profesionales que forman la red comercial de John Deere en Portugal.



### 2.2.2 JOHN DEERE IBÉRICA EN LA ACTUALIDAD

Actualmente, John Deere Ibérica S.A. es la filial comercial de John Deere en España y Portugal, donde comercializa productos agrícolas y para el cuidado de espacios verdes y campos de golf. La red comercial está formada por 71 concesionarios y más de 163 puntos de servicio, en los que trabajan permanentemente más de 1.300 profesionales.

Además de por la unidad comercial, John Deere Ibérica S.A. está formada por la unidad fabril, cuya sede social se encuentra en Getafe (Madrid). Esta factoría, que pertenece a la División de Cosechadoras de la división agrícola de Deere & Company, cuenta con modernas instalaciones para la fabricación de componentes de maquinaria agrícola.

La totalidad de la producción de esta fábrica, tiene como destino otras factorías de la compañía en Alemania, Francia, EE.UU., Argentina, México y Brasil, lo que incluye a John Deere Ibérica S.A. entre las 160 primeras empresas exportadoras de nuestro país.

Las instalaciones de la factoría, en la que trabajan cerca de 1000 personas, ocupan una superficie cubierta de 60.000 m<sup>2</sup> sobre un área total de 20 hectáreas de parcela. Ver Figura 2.2.



**Figura 2.2:** Vista aérea de la factoría de Getafe

La fábrica de Getafe está constituida por cuatro divisiones de producción especializada, conocidas con el nombre de minifábricas que son divisiones seleccionadas por grupo de componentes similares, en las que las actividades de

producción, fabricación, mantenimiento, calidad y embarques son propias, mientras que las tareas de planificación y administración se encuentran centralizadas.

Estas cuatro minifábricas son: Cajas Pesadas de Transmisión, Cajas Ligeras de Transmisión, Ejes y Engranajes y Mandos Finales. Cada una de estas minifábricas está constituida por diferentes células de montaje (en el caso de Cajas Pesadas, Cajas Ligeras de Transmisión y Mandos Finales), y células de fabricación (en el caso de Ejes y Engranajes y Mandos Finales).

### 2.2.3 PRODUCTOS

De acuerdo con las cuatro divisiones de producción especializada de las que consta John Deere Ibérica S.A., se puede realizar la siguiente clasificación de productos:

- **Cajas pesadas de transmisión:** Estas cajas de transmisión se caracterizan porque su peso supera los 100 Kg. La factoría de Getafe produce una amplia variedad de cajas de transmisión para máquinas cosechadoras de cereales, algodón y forraje, producidas en Harvester y Des Moines (EEUU) y Zweibrücken (Alemania).



**Figura 2.3:** Cajas pesadas de transmisión producidas en John Deere Ibérica

- **Cajas ligeras de transmisión:** Estas cajas de transmisión se montan en segadoras y tractores para espacios verdes, empacadoras, tractores agrícolas, maquinaria de siega y maquinaria de construcción. Su principal diferencia respecto a las transmisiones pesadas es que su peso no supera los 100 Kg.



**Figura 2.4:** Cajas ligeras de transmisión producidas en John Deere Ibérica

- **Ejes y engranajes:** El área de producción de ejes y engranajes fabrica piezas vitales para las minifábricas de cajas pesadas y cajas ligeras. También se encarga de la producción de engranajes para motores de John Deere que se producen en Dubuque y Waterloo (EEUU), Saran (Francia), Torreón (Méjico) y Rosario (Argentina). Las claves de la fabricación de estos componentes son una mecanización muy precisa, una elevada minuciosidad en los procesos de tratamiento térmico y un control de calidad continuo y riguroso.



**Figura 2.5:** Engranajes mecanizados en John Deere Ibérica

- **Mandos finales y enganches tripuntales:** La producción especializada de enganches tripuntales para tractores de muy diversa potencia, está programada para atender la demanda de las factorías de tractores de Mannheim (Alemania), Augusta (EEUU), Saltillo (Méjico) y Horizontina (Brasil). La producción de mandos finales se distribuye a las fábricas de





Harvester y Des Moines (EEUU), Zweibruecken (Alemania) Dubuque y Davenport.



**Figura 2.6:** Mandos finales y enganches tripuntales producidos en John Deere Ibérica

Para la fabricación de estos componentes se lleva a cabo un proceso muy preciso de mecanizado de piezas y montaje. El perfecto funcionamiento de los componentes se asegura sometiendo los conjuntos a estrictos controles de calidad y rigurosas pruebas, en las propias líneas de montaje final.

### 2.2.4 ORGANIGRAMA GENERAL

La estructura organizativa de John Deere Ibérica, se desarrolla en torno a siete grandes áreas que dependen directamente del Director General de la Fábrica y Consejero Delegado de John Deere Ibérica S.A., tal y como puede verse en la Figura 2.7.

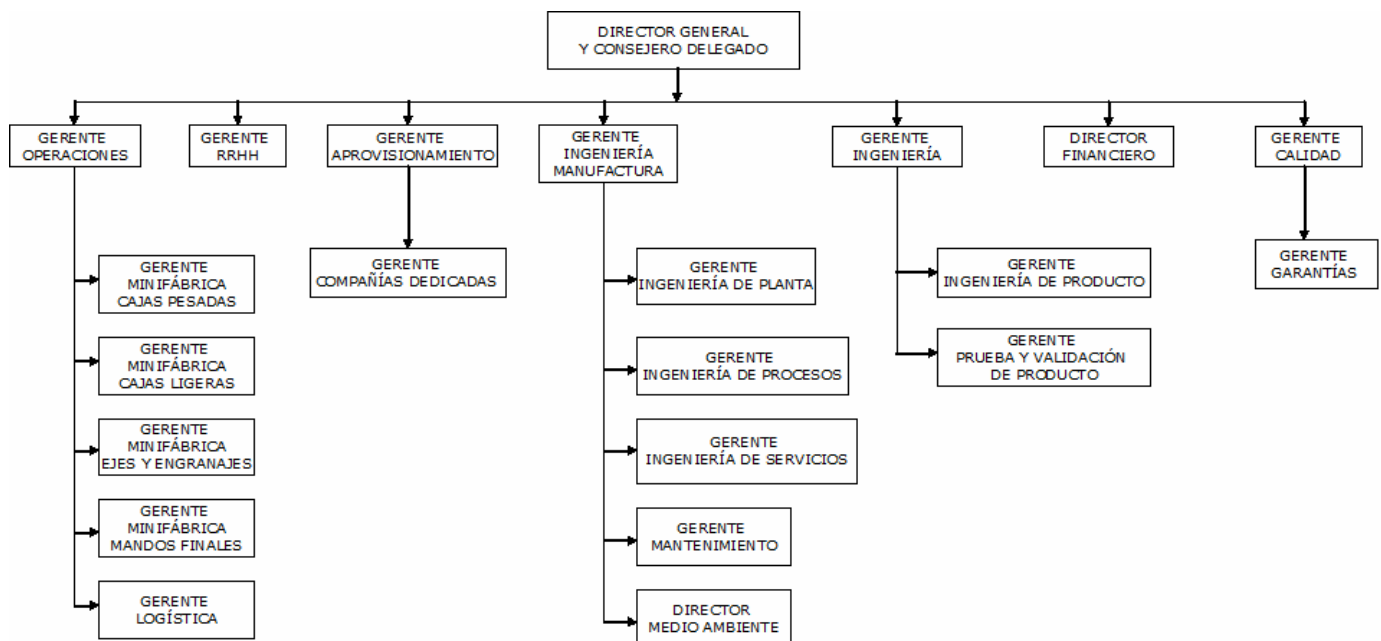


Figura 2.7: Organigrama general

Las responsabilidades del Director General y de los cargos que dependen directamente de éste son las siguientes:

- **Director General:** Asegurar que las unidades organizativas y sus gerentes cumplen con todas las políticas y objetivos vitales de la compañía.
- **Gerente de Operaciones:** Responsable de la producción, embarques, seguridad, control de inventarios, calidad, costes de los productos y repuestos manufacturados en las distintas minifábricas que tiene a su cargo, así como de la gestión de aprovisionamientos.
- **Gerente de Recursos Humanos:** Responsable de contratación y formación del personal de la compañía; control del desarrollo profesional del personal; discusión, negociación y administración del Convenio Colectivo; relaciones laborales con el Comité de Empresa y Centrales Sindicales; servicio de prevención, higiene y seguridad; y Servicio Médico.
- **Gerente Aprovisionamiento:** Responsable del Aprovisionamiento, Calidad y Coste de los materiales comprados.



- **Gerente de Ingeniería de Manufactura:** Responsable de las ingenierías de Planta, Procesos, Servicios, Industrial, Utillaje y Mantenimiento de Equipos e Instalaciones (área donde se enmarca el presente Proyecto Fin de Carrera).
- **Gerente de Ingeniería:** Responsable de las ingenierías de Producto, así como de coordinar e implantar el desarrollo de los componentes, desde las etapas iniciales del proyecto hasta la producción.
- **Director Financiero:** Responsable de Contabilidad, facturación, cuentas a cobrar/pagar, nóminas, costos, presupuestos y precios.
- **Gerente de Calidad:** Responsable del control y supervisión del Sistema de Gestión de Calidad, y como tal es responsable del liderazgo, coordinación y enfoque de las diferentes actividades de Calidad, asegurando que el Sistema de Calidad se desarrolla, documenta, implanta y mantiene.

### 2.2.5 POLÍTICA DE CALIDAD Y MEDIO AMBIENTE

John Deere ha adquirido el compromiso de implantar un Sistema de Gestión de Calidad y Medio Ambiente, cumpliendo con los requisitos de las Normas UNE-EN ISO 9001 y UNE-EN ISO 14001, que le permitan llevar a cabo su misión de proveer, por medio de sus actividades de ingeniería, fabricación y ventas, componentes de la más alta calidad a las unidades John Deere en el mundo, potenciando la satisfacción de los clientes, la innovación, el crecimiento rentable, la protección medioambiental y la mejora continua.



### 2.3 CONCLUSIONES

El objetivo de este capítulo es hacer una descripción general de la compañía Deere & Company, y de forma particular de su filial española, John Deere Ibérica S.A.

Para ello, en primer lugar se explica la evolución seguida por la compañía, desde que fue fundada en 1937, hasta hoy en día. En la actualidad, Deere & Company proporciona empleo directo a 56.000 personas, dispone de una red de más de 60 fábricas y centros de producción, y más de 5.000 concesionarios para dar servicio a sus clientes.

También se describen las tres principales divisiones de las que consta la compañía: Agrícola y Espacios Verdes, Construcción y Forestal y División Financiera.

A continuación se detalla la evolución de John Deere Ibérica S.A., fábrica que fue adquirida en 1956 por Deere & Company, y que hasta 1994 estuvo produciendo distintas series de tractores John Deere.

En la actualidad, la factoría de Getafe se dedica exclusivamente a la fabricación de componentes para el resto de las fábricas de Deere & Company en el mundo. Las principales actividades que se realizan en esta factoría son la fabricación de ejes y engranajes, y el montaje de mandos finales y cajas de transmisión para cosechadoras.

Los destinos de estos componentes son factorías de la compañía en Alemania, Francia, EE.UU., Argentina, México y Brasil, lo que incluye a John Deere Ibérica S.A. entre las 160 primeras empresas exportadoras de nuestro país.

Por último se hace una breve descripción del organigrama de John Deere Ibérica S.A., así como de la política de calidad y medio ambiente con la que se encuentra comprometida actualmente.





## *CAPÍTULO 3:*

## *MECANIZADO DE EJES EN LA CÉLULA 82*



### 3. MECANIZADO DE EJES EN LA CÉLULA 82

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

La Minifábrica de Ejes y Engranajes, tal y como se comentó en el capítulo anterior, está formada por numerosas células de fabricación. Una célula de fabricación es un conjunto de máquinas-herramienta con un Layout dispuesto de manera que se optimice el proceso de producción.

Este proyecto, cuyo objetivo es implantar un sistema MQL para optimizar el proceso de tallado por generación, se lleva a cabo en la talladora de ejes de la célula 82. Por ello, en este capítulo se realiza una descripción de dicha célula, comentando cuales son las técnicas utilizadas por John Deere Ibérica en el mecanizado de ejes y engranajes.

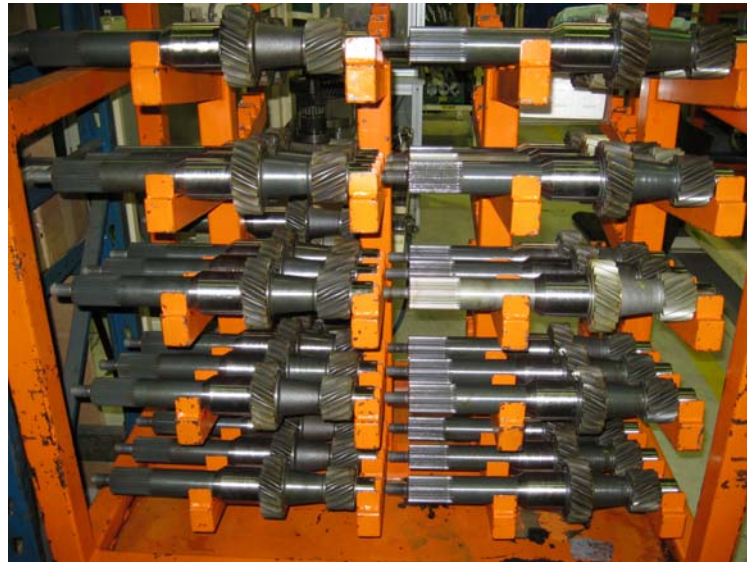
Dentro de la Minifábrica de Ejes y Engranajes se mecanizan engranajes de motor y engranajes de transmisión. Al mecanizar un engranaje de motor, se parte de un disco de forja, sobre el que se realiza el mecanizado de los dientes en un proceso denominado tallado por generación, que será explicado en profundidad en el siguiente capítulo.



Figura 3.1: Engranajes de motor



Los engranajes de transmisión también son mecanizados mediante tallado por generación, pero la principal diferencia con los engranajes de motor, es que los de transmisión son tallados directamente sobre un eje. De esta forma, la pieza de partida es un cilindro de forja, sobre el que una vez torneado se talla el engranaje. Por ello, estas piezas reciben el nombre de ejes de transmisión.



**Figura 3.2:** Ejes de transmisión

Es importante destacar que en los ejes de transmisión, además de tallarse uno o varios engranajes, suele tallarse al menos un estriado utilizando para ello el mismo proceso de mecanizado.

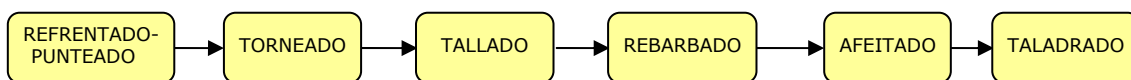
En consecuencia, este proceso se denomina tallado de engranajes o tallado de ejes, en función de si la pieza de partida es un disco o un cilindro respectivamente. Así, las máquinas que realizan este proceso reciben el nombre de talladoras de engranajes o talladoras de ejes.

En el caso concreto de la célula 82, se mecanizan distintos tipos de ejes que posteriormente van a parar a las células de montaje de Mandos Finales y Cajas Pesadas de Transmisión.

La materia prima que alimenta a esta célula de fabricación son piezas de fundición procedentes de un proveedor externo, mientras que el producto final es un eje tallado con un estriado y un dentado recto o helicoidal en función del tipo de pieza a mecanizar.

Esta célula está formada por seis máquinas-herramienta: refrentadora-punteadora, torno CNC, talladora de ejes CNC, rebarbadora, afeitadora y centro de mecanizado.

Cada una de las piezas (o ejes) que se mecaniza en la célula 82, va pasando sucesivamente por las distintas máquinas-herramienta siguiendo siempre el mismo orden. En la siguiente figura se representa el flujo seguido por una pieza en su mecanizado:



**Figura 3.3:** Flujo seguido por una pieza en la célula 82

A continuación se muestra la evolución de una pieza a medida que avanza por las distintas máquinas-herramienta:



**Figura 3.4:** Evolución de las piezas en la célula 82 desde la entrada hasta la salida

### 3.2 LAYOUT DE LA CÉLULA 82

La distribución en planta (layout) de la célula 82 es la siguiente:

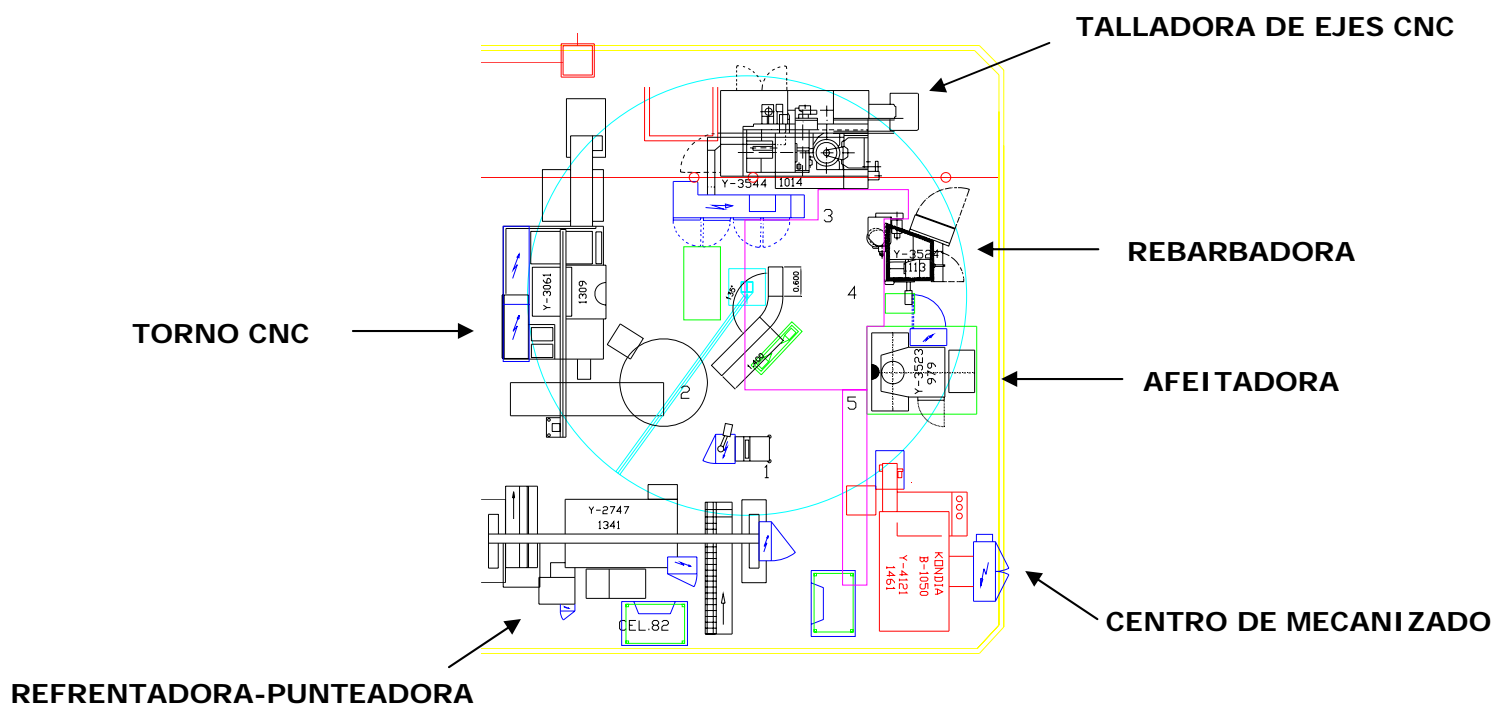


Figura 3.5: Layout de la célula 82

Todas las piezas entran a la célula por la refrentadora-punteadora y avanzan por las distintas máquinas herramienta en sentido horario.



Figura 3.6: Imagen de la célula 82





### 3.3 COMPOSICIÓN DE LA CÉLULA 82

Como se ha comentado en los anteriores apartados, la célula está compuesta por seis máquinas-herramienta:

➤ **REFRENTADORA PUNTEADORA** (Nº de máquina Y27-47 1341)

La pieza procedente de fundición es colocada manualmente por el operario en un carro portador, a continuación el robot coloca la pieza en su posición para llevar a cabo las operaciones de refrentado y punteado.

En la operación de refrentado se mecanizan las caras de los dos extremos del eje, utilizando una fresa de plaquitas intercambiables que realiza un fresado frontal. La sujeción de la pieza se realiza mediante mordazas.

En la operación de punteado se utiliza una broca de puntear en la intersección del eje longitudinal de la pieza con cada una de las dos caras refrentadas anteriormente.



**Figura 3.7:** Refrentadora-punteadora



**Figura 3.8:** Piezas refrentadas y punteadas



### ➤ **TORNO CNC Danobat Danumeric NI-650 (Nº Y30-61 1309)**

La pieza procedente de la refrentadora es depositada manualmente por el operario sobre un carro. A continuación, el robot transporta dicha pieza hasta el interior del torno donde se monta entre puntos.

En el torno el eje recibe un cilindrado exterior, para ello se dispone de un portaherramientas de plaquitas intercambiables. Un extractor de charnela se encarga de evacuar la viruta.

Una vez ha sido torneado el eje, éste es transportado por el robot hasta una mesa en la que el operario comprueba si las medidas son las correctas mediante unos calibres (calibre de herradura y calibre pasa-no pasa).

Por último se realiza el marcado de la pieza mediante punteado, quedando así inscrito el código de identificación de cada pieza.



**Figura 3.9:** Torno CNC



**Figura 3.10:** Torno CNC y su portaherramientas

### ➤ **TALLADORA DE EJES CNC Liebherr LC 502 (Nº Y35-44 1014)**

La pieza es transportada por el operario con ayuda de un carrito y un polipasto hasta el interior de la talladora, donde el montaje se realiza entre puntos.



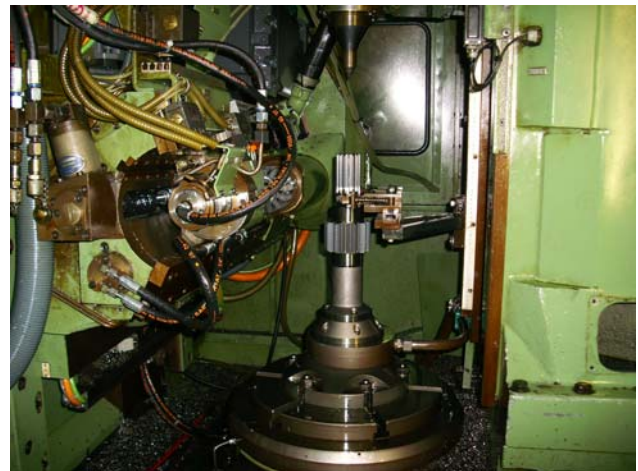
El mecanizado de los dientes del engranaje se realiza mediante el proceso de tallado por generación, utilizando para ello una fresa madre. Esta herramienta tiene forma de tornillo sinfín, con los filetes interrumpidos por ranuras longitudinales para crear dientes con aristas de corte. Con esta talladora pueden mecanizarse engranajes rectos y helicoidales.

Además del dentado, todas las piezas que pasan por la talladora llevan un estriado. Esta operación se realiza también mediante tallado por generación utilizando otra fresa madre. Por ello, esta talladora dispone en el carro portaherramientas de dos fresas, ambas enterizas, pero con tamaños y formas de dientes diferentes.

Para verificar si el tallado del engranaje ha sido correcto, el operario mide el espesor cordal entre varios dientes con un micro de platillos. El estriado es verificado mediante un calibre pasa-no pasa.



**Figura 3.11:** Talladora de ejes CNC



**Figura 3.12:** Detalle de la talladora y su portaherramientas

### ➤ **REBARBADORA Carl Hurth ZK10 (Nº Y35-24 1311)**

La pieza es colocada manualmente en la rebarbadora, donde se elimina la rebaba formada en los dientes durante su tallado. Para ello se utiliza un soporte entre dientes y una fresa de forma.





Figura 3.13: Rebarbadora

➤ **AFEITADORA Carl Hurth ZSA 220 (Nº Y35-23 0979)**

La colocación de la pieza es de forma manual, la sujeción se realiza entre puntos. El afeitado de los dientes de la pieza se realiza con un disco afeitador. Esta herramienta presenta dientes con numerosas estrías que dan lugar a los filos de corte utilizados para separar pequeñas virutas de material sobrante.

Para ello, ambas ruedas (pieza y herramienta) giran acopladas con una cierta presión de contacto, al mismo tiempo que se produce un desplazamiento axial relativo que equivale al movimiento de avance.

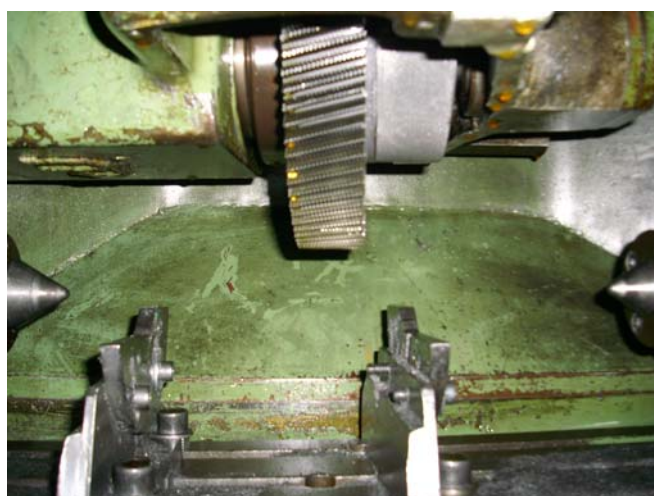


Figura 3.14: Detalle de la afeitadora



### ➤ CENTRO DE MECANIZADO Kondia B 1050 (Nº Y41-21 1461)

La colocación de la pieza es manual. La sujeción se realiza mediante una garra con un dispositivo hidráulico. Este centro de mecanizado únicamente se utiliza para realizar taladros en algunas piezas, por lo que no todos los ejes mecanizados en la célula 82 pasan por esta máquina-herramienta.



**Figura 3.15:** Centro de mecanizado CNC



**Figura 3.16:** Detalle del centro de mecanizado

Después de pasar por las diferentes máquinas-herramienta de la célula, las piezas se apilan en contenedores para facilitar su transporte.



**Figura 3.17:** Piezas a la salida de la célula 82



Tras pasar por la célula 82, algunas piezas pasan por otra célula de mecanizado, donde se procede a realizar algún chavetero o algún taladro más en función de los requerimientos de cada pieza.

Concluido el proceso de mecanizado, todas las piezas son transportadas a la zona de tratamientos térmicos, donde se realiza o bien un proceso de temple por inducción o bien un proceso de cementación seguido de un temple, obteniendo de esta manera mayor dureza superficial en la pieza.

A continuación se realiza un rectificado sobre la zona donde irán colocados los rodamientos. Posteriormente en algunas de las piezas se realiza un tratamiento denominado *shot peening*<sup>1</sup> y por último se lleva a cabo el montaje final en cajas pesadas o en mandos finales en función del tipo de pieza del que se trate.

<sup>1</sup> El *shot peening* es una tecnología especial de tratamiento de superficie del campo del granallado. El objetivo de este proceso es incrementar la resistencia a la fatiga de los componentes sometidos a fuerte tensión. Es un proceso frío donde la superficie del componente es granallada con granalla redonda pequeña. El efecto positivo del *shot peening* es inducir una tensión compresiva uniforme en la capa de la superficie del componente. Las ventajas de la tensión compresiva interna son: una mayor resistencia a la fatiga, fatiga por corrosión, rotura por tensión de corrosión, corrosión inducida por hidrógeno, corrosión por abrasión y material de erosión.



### 3.4 PIEZAS MECANIZADAS EN LA CÉLULA 82

En la célula 82 se mecanizan ocho modelos de piezas distintas, cada modelo se identifica mediante un código alfanumérico. Estos códigos, junto con sus horas estándar correspondientes, pueden verse en la Tabla 3.1.

TIPO DE PIEZA	HRS.STD
CE 18223	0,179
CE 19096	0,179
CE 20126	0,196
T 218791	0,174
T 218793	0,174
T 218794	0,174
T 218795	0,174
T 218796	0,174

**Tabla 3.1:** Tipos de piezas mecanizadas en la célula 82 junto a sus horas estándar correspondientes

Las horas estándar (HRS.STD) indican el número de horas invertido para realizar una pieza en la célula. Por ejemplo, el estándar 0,179 indica que deben realizarse 100 piezas en 17,9 horas. Siempre se refiere a piezas finalizadas.

La célula está en funcionamiento de lunes a viernes 24 horas al día (aunque si hay picos de demanda puede ampliarse a sábados y domingos). Por este motivo hay 3 turnos de trabajo de 8 horas cada uno: mañana, tarde y noche. En cada turno hay un operario trabajando en la célula.

De este modo, por ejemplo, para la pieza CE 18223 las horas estándar son 0,179, lo que quiere decir que el operario en su turno de trabajo debe finalizar 45 piezas.

$$\frac{8 \text{ horas/turno}}{0,179 \text{ horas/pieza}} = 44,69 \text{ piezas/turno}$$

Esto es así, siempre y cuando la célula no tenga que parar por avería o por alguna causa externa.



El volumen de producción previsto para cada tipo de pieza desde Septiembre de 2009 hasta Agosto de 2010 es el siguiente:

TIPO DE PIEZA	PRODUCCIÓN
CE 18223	6.977
CE 19096	2.976
CE 20126	4.678
T 218791	68
T 218793	345
T 218794	106
T 218795	84
T 218796	466

**Tabla 3.2:** Volumen de producción anual previsto para cada tipo de pieza mecanizada en la célula 82

Por lo tanto, la producción anual prevista en la célula 82 es de 15.700 piezas.

Una vez que se han mecanizado las piezas, han sido sometidas a los tratamientos térmicos correspondientes y han sido rectificadas, se lleva a cabo su montaje:

- Las piezas T 218791, T 218793, T 218794, T 218795 y T 218796 van montadas en el mando final del *Crawler*<sup>1</sup>.
- Las piezas CE 18223 y CE 19096 van montadas en la transmisión *3 Speed*<sup>2</sup>.
- La pieza CE 20126 va montada en la transmisión *Prodrive*<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Un *Crawler* es un tractor oruga utilizado en el sector de la construcción.

<sup>2</sup>El sistema *3 Speed* o tres velocidades es un sistema de transmisión utilizado en cosechadoras.

<sup>3</sup>El sistema *Prodrive* es un tipo de transmisión utilizado en cosechadoras que permite un control preciso de la velocidad.



### 3.5 CONCLUSIONES

El objetivo de este capítulo es hacer una descripción de la célula 82, perteneciente a la Minifábrica de Ejes y Engranajes, para dar una idea general de cómo es el proceso de mecanizado de ejes y engranajes en John Deere Ibérica S.A.

En esta célula se mecanizan distintos tipos de ejes, de forma que a la entrada de la misma se dispone de un cilindro de acero procedente de forja, y a la salida se obtiene un eje con un dentado (recto o helicoidal) y un estriado. En este proceso de mecanizado las piezas pasan por seis máquinas-herramienta: refrentadora-punteadora, torno, talladora, rebarbadora, afeitadora y centro de mecanizado.

Para realizar una descripción detallada de cómo se distribuyen las distintas máquinas-herramienta en la célula se muestra su layout, explicando cual es el orden que siguen las piezas.

Posteriormente se comentan las principales características de cada máquina-herramienta, explicando cada una de las operaciones de mecanizado que se llevan a cabo en esta célula.

También se realiza una descripción de los principales tratamientos térmicos que reciben las piezas una vez han sido mecanizadas, siendo éstos principalmente dos: temple por inducción y cementación seguida de un temple.

Por último, se hace referencia a los ocho tipos de ejes que se mecanizan en la célula 82, describiendo las horas estándar, la producción prevista y dónde se realiza el montaje final de cada una de estas piezas.



## *CAPÍTULO 4:*

## *TALLADO DE ENGRANAJES*





## 4. TALLADO DE ENGRANAJES

### 4.1 DESCRIPCIÓN Y TIPOS DE TALLADO

Los procedimientos más empleados en la fabricación de engranajes son mediante arranque de viruta, debido a que de esta manera se puede conseguir una gran precisión en el tallado.

Los dos métodos más empleados en el tallado de engranajes son los siguientes:

- Tallado con fresa de forma: se usan herramientas con perfil idéntico al hueco interdental. La rueda a tallar permanece en reposo durante la operación de corte, y gira una división cuando el hueco ha sido terminado. Los sucesivos giros de avance de la rueda se efectúan mediante un dispositivo divisor. El tallado con fresa de forma, tiene inconvenientes debido a la escasa precisión en la división y a los largos tiempos de mecanizado, por lo que tan solo se utiliza para fabricar pequeñas series de ruedas dentadas.
- Tallado por generación o con fresa madre: Se trata de un procedimiento continuo por permitir una fabricación continua de dientes en toda la periferia de la rueda, es decir, sin interrupciones en la operación de arranque de viruta. La generación del diente se produce mediante una fresa madre, que no es más que una herramienta en forma de tornillo sinfín con los filetes interrumpidos por ranuras longitudinales para crear aristas de corte y cuya sección, normal a la hélice, reproduce precisamente la cremallera de generación del diente.

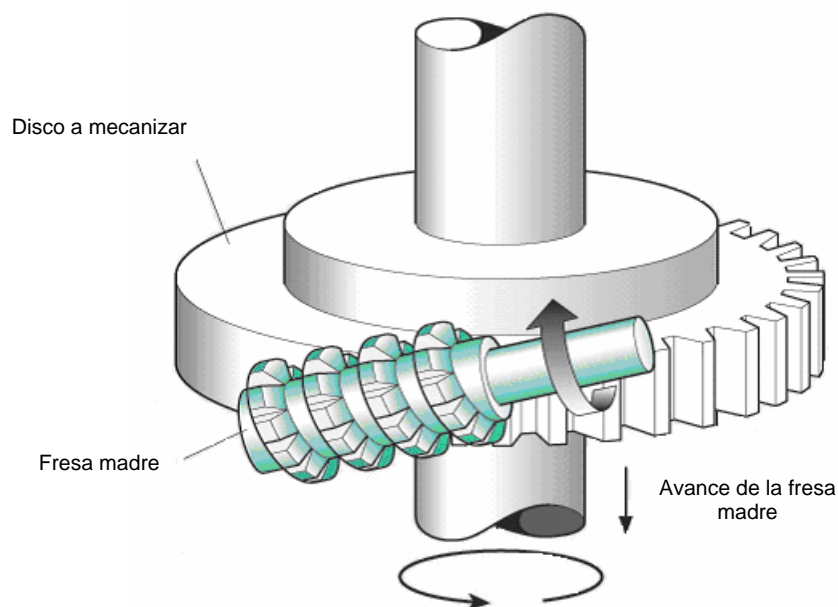
### 4.2 TALLADO POR GENERACIÓN

Con este procedimiento se pueden mecanizar engranajes rectos y helicoidales, piezas estriadas, tornillos sin fin, cremalleras y muchos otros tipos de piezas con formas especiales.



#### 4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL TALLADO POR GENERACIÓN

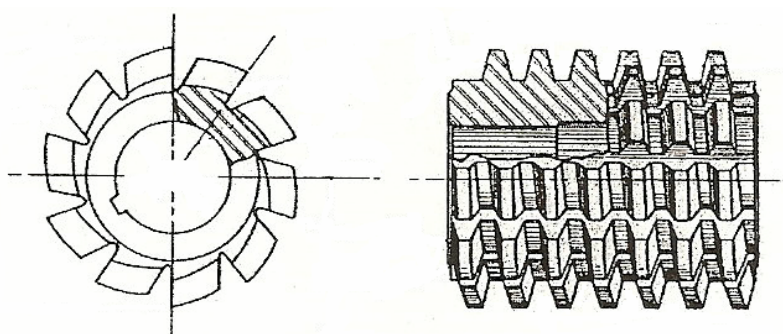
El tallado por generación es un proceso continuo en el que, tanto la herramienta de corte como la pieza de trabajo, giran dentro de una relación constante. La fresa madre está dotada de movimiento de rotación así como de movimiento vertical de ascenso y descenso, y además se puede aproximar a la pieza para conseguir la altura de diente deseada. La pieza gira, entretanto, sobre su eje. Una vez que la fresa madre ha recorrido la totalidad de la cara del engranaje, todos los dientes del mismo han sido totalmente formados.



**Figura 4.1:** Esquema de tallado por generación

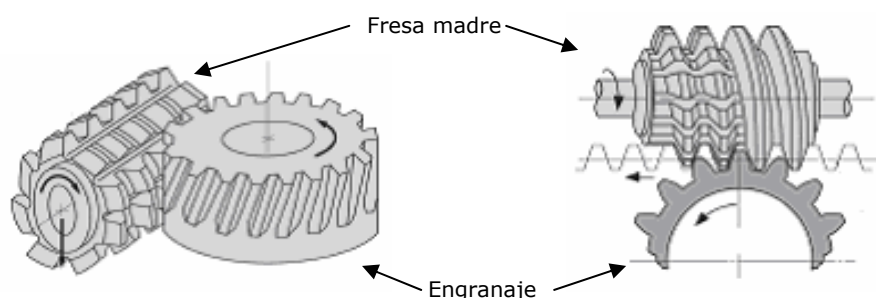
En el mecanizado de engranajes rectos con una fresa madre de un solo filete, el disco a mecanizar avanza el equivalente a un espacio interdental por cada rotación de la herramienta, es decir, para tallar por ejemplo una rueda dentada con 40 dientes, la rueda a tallar dará una sola vuelta por cada 40 que de la fresa madre.

La fresa madre es básicamente un tornillo sinfín con ranuras longitudinales que interrumpen los filetes, proporcionando así las aristas de corte. Cada uno de los dientes de la fresa está formado de manera tal que debe permitir su afilado, pero manteniendo el perfil original del diente.



**Figura 4.2:** Fresa madre

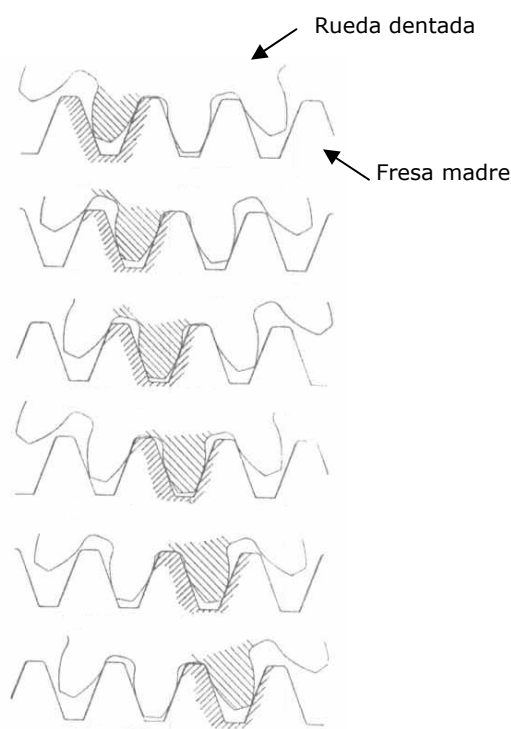
A continuación, se observan dos figuras que muestran el movimiento coordinado y continuo entre la fresa madre y el engranaje.



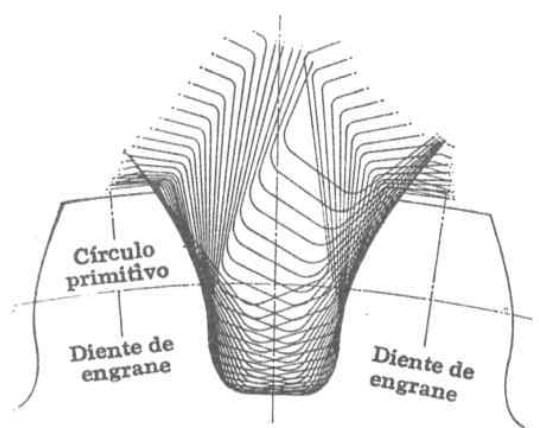
**Figura 4.3:** Movimiento coordinado y continuo entre la fresa madre y el engranaje

Los dientes de la fresa cortan el cuerpo del disco del engranaje en orden sucesivo y cada uno de ellos en una posición ligeramente distinta. Cada diente de la fresa madre cortará su perfil correspondiente, que en el caso de tratarse de una fresa para engranajes con perfil evolvente tiene los lados rectos, pero la acumulación de esta serie de cortes rectos produce la forma curvada en los dientes del engranaje. Ver figuras 4.4 y 4.5.

En consecuencia, los dientes no se mecanizan en un solo corte de perfil, como ocurre en el fresado de forma, sino que cada diente se va formando de manera gradual, por medio de una serie de pequeños cortes. Esto es lo que se conoce como proceso de tallado por generación.



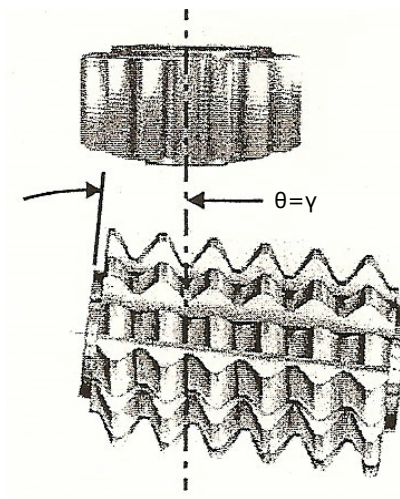
**Figura 4.4:** Desarrollo de la forma de los dientes de un engranaje por los dientes de corte de una fresa madre



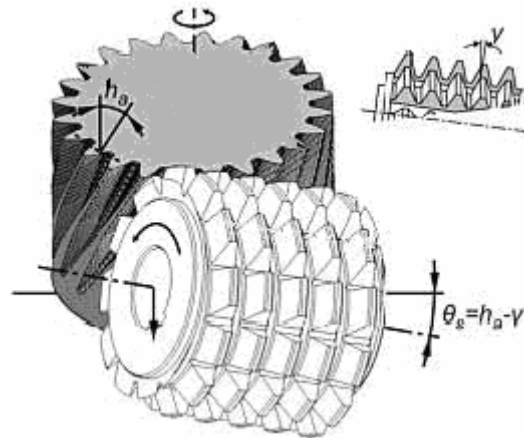
**Figura 4.5:** Secuencia del desarrollo completo del tallado por medio de la fresa madre

El ángulo de presión normal del engranaje a tallar, se corresponde generalmente con el ángulo de presión de la fresa madre, que está formado por la inclinación del flanco del diente. Otro parámetro que caracteriza a la fresa madre es el módulo, que de forma general, también se corresponde con el módulo del engranaje a mecanizar.

En cuanto al ángulo de montaje de la fresa madre ( $\theta$ ), dependerá del tipo de engranaje que se desee tallar. Así para mecanizar ruedas de diente recto, el eje de la fresa madre debe tener una inclinación igual a la hélice media de la misma ( $\gamma$ ). Para dentar ruedas helicoidales habrá que sumar el ángulo de hélice de la fresa madre al ángulo de hélice del engranaje si giran en sentidos opuestos, y si ambos giran en el mismo sentido la operación será de resta. Ver figuras 4.6 y 4.7.



**Figura 4.6:** Ángulo de montaje de la fresa madre para dentado recto



**Figura 4.7:** Ángulo de montaje de la fresa madre para dentado helicoidal

#### 4.2.2 PARÁMETROS Y TIEMPOS DE CORTE.

Se denominan magnitudes de corte o parámetros tecnológicos de corte, a los valores que hay que ajustar en el proceso de arranque de viruta para que éste se realice de forma óptima. Se distinguen la velocidad de corte, el avance y la profundidad de corte.

- La **velocidad de corte** es la velocidad lineal de un punto periférico de los dientes de la fresa madre que están en contacto con la pieza que se mecaniza. Viene dada por la siguiente expresión:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \text{ (m/min)}$$

D = diámetro de la fresa madre en milímetros.

N = número de revoluciones por minuto de la fresa madre.

La velocidad de corte es el parámetro que más influye en la vida de la herramienta, a mayor velocidad ésta se desgastará más. Para ajustar dicha velocidad debe considerarse la maquinabilidad del material de la pieza que se mecaniza, el material y recubrimiento de la fresa madre, la sección de viruta, el tipo de refrigeración utilizado en el mecanizado y la capacidad de la máquina talladora.



- El **avance** es el desplazamiento relativo entre pieza y fresa, realizándose en la dirección del eje de la rueda que se pretende dentar. Este parámetro se ajusta en función del material que está siendo mecanizado, del material de la herramienta, de la precisión requerida, etc.

Conocidos la velocidad de giro de la pieza y el avance por revolución se puede calcular la velocidad de avance mediante la siguiente expresión:

$$V_a = a \cdot N_G \text{ (mm/min)}$$

$a$  = avance de la fresa en milímetros por cada revolución del engranaje a tallar.

$N_G$  = velocidad de giro del engranaje a tallar en rpm.

Donde:

$$N_G = \frac{n \cdot N}{G} \text{ (rev/min)}$$

$n$  = velocidad de giro de la fresa madre en rpm.

$N$  = número de filetes o entradas de la fresa madre.

$G$  = número de dientes del engranaje a dentar.

Por lo que la velocidad de avance viene dada por la siguiente expresión:

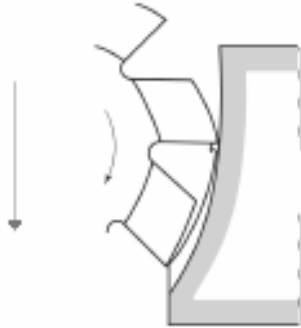
$$V_a = \frac{a \cdot n \cdot N}{G} \text{ (mm/min)}$$

Es importante destacar que en función del sentido del avance de la fresa madre, hay dos modalidades de tallado (o fresado) por generación: en trepado y convencional.

En el fresado por generación convencional el espesor de viruta va aumentando desde cero hasta que alcanza su máximo valor, de forma que el esfuerzo de corte también va aumentando progresivamente. Ver figura 4.8.

Con el fresado por generación en trepado ocurre todo lo contrario, los dientes de la fresa comienzan cortando la viruta desde su máximo espesor.

Se necesita mayor potencia de corte, pero se permiten mayores avances y el acabado superficial es mejor. Ver Figura 4.9.



**Figura 4.8:** Fresado por generación convencional



**Figura 4.9:** Fresado por generación en trepado

- La **profundidad** de corte es la distancia que penetra la herramienta en la pieza, que en el caso del tallado por generación coincide con la altura del diente a mecanizar. Se expresa en milímetros.

El ajuste de los parámetros de corte debe realizarse de acuerdo con el acabado y la precisión requeridos, con la capacidad de la máquina, con la herramienta empleada y con los dispositivos de sujeción utilizados para el montaje y movimiento de la pieza de trabajo.

El **tiempo de corte** en el tallado por generación, es el cociente entre la distancia lineal que tiene que recorrer la fresa madre, y la velocidad de avance. La expresión matemática correspondiente es:

$$\text{Tiempo de corte} = \frac{L}{V_a} = \frac{G \cdot L}{N \cdot n \cdot a} \text{ (min)}$$

G = número de dientes del engranaje a dentar.

L = recorrido de la fresa, en milímetros.

N = número de filetes o entradas de la fresa madre.

n = número de revoluciones por minuto de la fresa madre.

a = avance de la fresa en milímetros por cada revolución del engranaje a tallar.

El recorrido de la fresa ( $L$ ), es la suma de la distancia de aproximación ( $X1$ ), el ancho de la cara del engranaje ( $B$ ) y el desplazamiento para permitir la salida de la fresa ( $X2$ ). La distancia de aproximación es el espacio entre el punto de contacto inicial de la fresa con la pieza de trabajo y aquel donde inicia el corte a la profundidad íntegra. La distancia para asegurar la salida de la fresa es el espacio recorrido más allá del corte más profundo y que se requiere para la completa formación de los dientes.

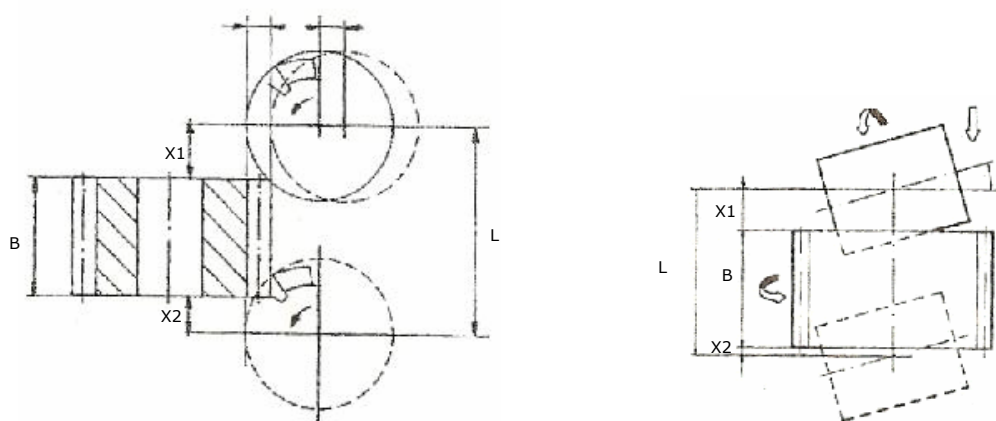


Figura 4.10: Detalle del recorrido de la fresa madre

#### 4.2.3 GEOMETRÍA DE CORTE

Para comprender el proceso de arranque de material suele utilizarse el caso más simplificado, el de corte ortogonal, en el que el filo de la herramienta es perpendicular a la dirección del desplazamiento relativo herramienta-pieza.

En el caso del tallado por generación existe un ángulo de inclinación de arista, el cual es resultado del ángulo de hélice y otros ángulos propios de la fresa madre, pero dado que este ángulo es siempre inferior a 15 grados, el estudio del proceso como corte ortogonal es una buena aproximación.

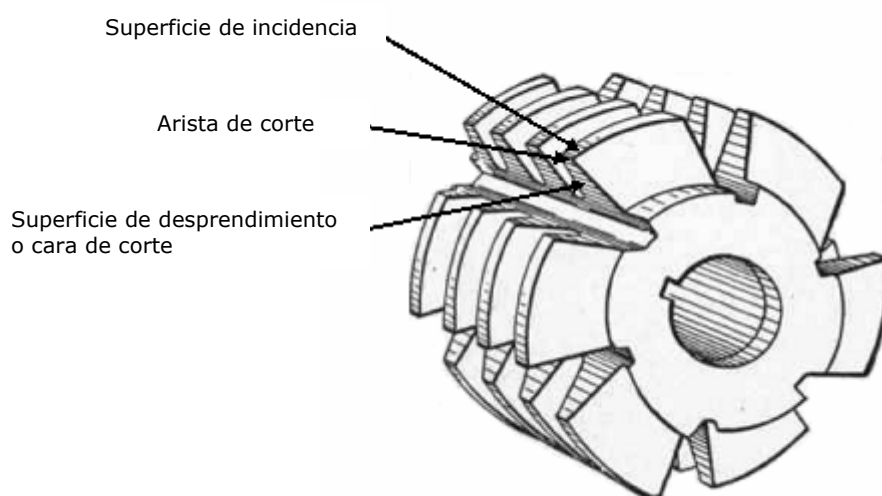
Los elementos más importantes de una herramienta en el corte ortogonal son:

- La **superficie de desprendimiento**: es la cara de la herramienta sobre la que desliza el material desprendido.



- La **superficie de incidencia**: es la cara de la herramienta que queda frente a la superficie trabajada de la pieza.
- El **filo o arista de corte**: es la intersección entre las superficies de incidencia y desprendimiento.

En el caso del tallado por generación, en cada diente de la fresa madre se pueden distinguir cada uno de estos tres elementos. Además, en las fresas madre la superficie de desprendimiento también es conocida como cara de corte.



**Figura 4.11:** Esquema de los elementos de corte principales en una fresa madre

Los ángulos que definen la posición de las superficies anteriores son los siguientes:

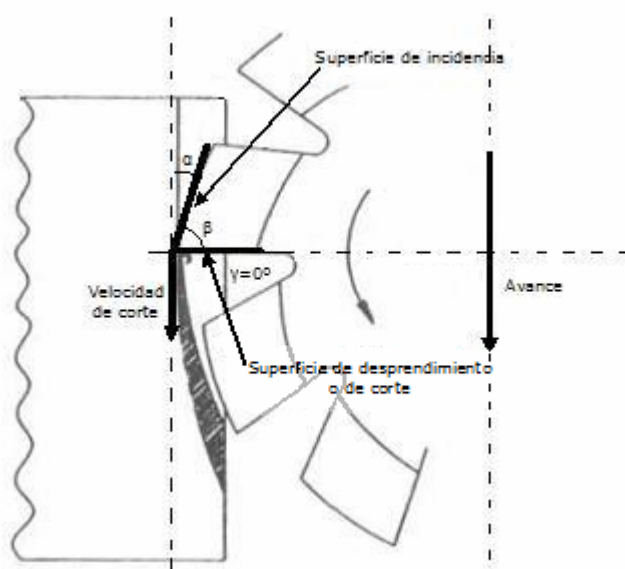
- **Ángulo de incidencia ( $\alpha$ )**: es el ángulo formado entre la superficie de incidencia y el plano que contiene el filo y la velocidad de corte. Para elegir el ángulo de incidencia correcto, habitualmente se tienen en cuenta consideraciones tales como el material de la pieza a mecanizar o el material de la herramienta. Esto se debe a que si este ángulo es muy grande el filo queda debilitado, y si por el contrario es muy pequeño el contacto con la pieza aumenta, provocando un rápido desgaste de la herramienta. En el caso del tallado por generación el ángulo de incidencia queda determinado únicamente por la geometría del dentado que se pretende mecanizar.
- **Ángulo de filo ( $\beta$ )**: es el ángulo formado entre las superficies de incidencia y desprendimiento. La suma de los ángulos de incidencia, filo y



desprendimiento deben sumar  $90^\circ$ , de manera que este ángulo será función de los otros dos.

- **Ángulo de desprendimiento ( $\gamma$ ):** es el ángulo formado entre la superficie de desprendimiento y el plano normal a la velocidad de corte y que contiene el filo. La elección del ángulo de desprendimiento suele estar condicionada por la resistencia del material de la herramienta, por el material a mecanizar y por el avance. De manera general, puede decirse que un ángulo de desprendimiento grande hace que la herramienta penetre y corte bien, dando un mejor acabado superficial pero quedando muy debilitado el filo, mientras que un ángulo de desprendimiento pequeño favorece la resistencia de la herramienta, pero la energía consumida y el calentamiento de la herramienta aumentan. En el caso del tallado por generación, el ángulo de desprendimiento también se conoce con el nombre de ángulo de corte, y es el ángulo formado entre la superficie de desprendimiento y el plano en el que se encuentra el eje de la fresa. En la gran mayoría de las fresas madre este ángulo es nulo, aunque se permite cierta tolerancia negativa.

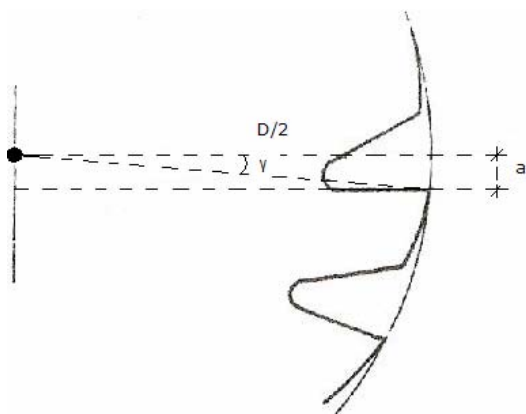
En la Figura 4.12 se puede observar la relación entre las distintas superficies y ángulos de corte de cada uno de los dientes de una fresa madre.



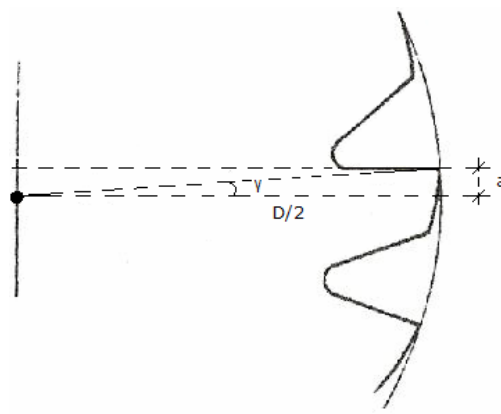
**Figura 4.12:** Esquema de la geometría de corte de una fresa madre

En la figura anterior se puede apreciar cómo, al ser perpendicular la velocidad de corte con la superficie de desprendimiento, el ángulo de desprendimiento es nulo ( $\gamma=0^\circ$ ), o lo que es lo mismo, la superficie de desprendimiento está contenida en un plano que a su vez contiene al eje de la fresa madre.

El ángulo de corte o de desprendimiento ( $\gamma$ ) es el ángulo principal a tener en cuenta en una fresa madre. Esto se debe principalmente a que las fuerzas de reacción del material que se mecaniza no actúan en el mismo filo, sino en una zona de la superficie de corte que se aleja del filo según varía el ángulo de desprendimiento. Es por ello que en función del ángulo elegido, los dientes de la fresa madre sufren desgastes muy distintos, afectando por tanto en gran medida a la vida de la fresa.



**Figura 4.13:** Ángulo de desprendimiento positivo



**Figura 4.14:** Ángulo de desprendimiento negativo

El ángulo de corte se puede calcular de manera sencilla de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{a}{D/2} = \frac{2 \cdot a}{D}$$

Siendo “a” la distancia entre el plano que contiene la superficie de desprendimiento y el plano que contiene el eje de la fresa madre.

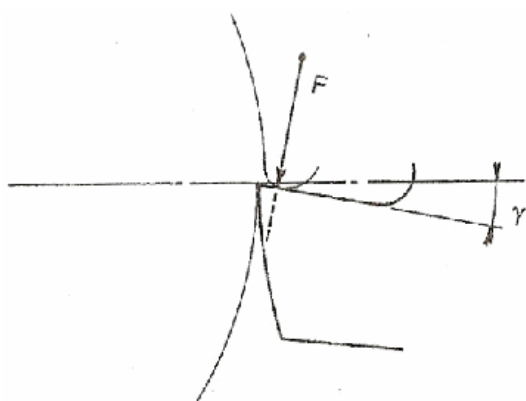
Suele utilizarse un ángulo de desprendimiento positivo cuando se mecanizan materiales blandos, como el aluminio o aceros muy maleables y cuando las



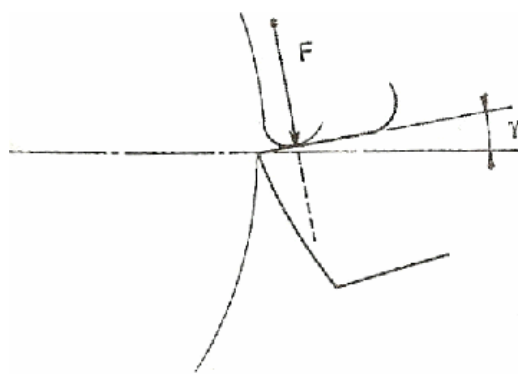
máquinas talladoras no alcanzan velocidades de corte muy altas. Debido a esto, la presión en el filo no es elevada, mejorándose por ello la acción de corte, pero al mismo tiempo el filo es más débil, y como la fuerza de corte es siempre perpendicular a la superficie de desprendimiento, la arista de corte tiende a mellarse.

El hecho de que la fuerza de corte no sea elevada también causa desgaste de cráter en la cara de corte, que al aumentar de forma lenta pero continua hacia la arista de corte puede provocar un mellado prematuro de la misma.

En el caso de que la fresa madre tuviese un ángulo de desprendimiento negativo, los dientes se vuelven más robustos, el desgaste de cráter se forma más rápidamente, pero más alejado de la arista de corte, por lo que el filo está más protegido, siendo más difícil que se produzca su mellado.



**Figura 4.15:** Reacción de la fuerza de corte en el caso de una fresa madre con ángulo de desprendimiento positivo



**Figura 4.16:** Reacción de la fuerza de corte en el caso de una fresa madre con ángulo de desprendimiento negativo

Esta dinámica es similar a la que se produciría en una herramienta de un solo diente. De manera esquemática puede decirse que cuanto más duro sea el material a mecanizar, mayores serán las fuerzas de corte y se necesitará mayor sección de herramienta para resistirlas, por lo que será necesario disminuir el ángulo de desprendimiento.



También habrá que tener en consideración el avance, ya que al aumentar éste, el espesor de viruta y las fuerzas de reacción son mayores, y en consecuencia habrá que reducir el ángulo de desprendimiento para tener un filo de corte más robusto.

### 4.2.4 TIPOS DE DESGASTE EN FRESAS MADRE

Los principales mecanismos que producen desgaste en una herramienta son:

- **Desgaste por abrasión:** se produce principalmente en la superficie de incidencia debido a las interferencias de rugosidades y a partículas libres que se clavan y arañan la herramienta.
- **Desgaste por adhesión:** es debido a las altas presiones y temperaturas alcanzadas en la zona de corte, provocando que en algunas condiciones se suelde el material de la viruta a las superficies de desprendimiento e incidencia de la herramienta. Este material soldado, modifica la geometría de corte y además puede desprenderse arrancando pequeños trozos de la herramienta, o rompiéndola completamente.
- **Desgaste por fatiga:** consiste en una combinación termomecánica, es decir, fluctuaciones de temperatura y de las fuerzas de mecanizado. Esto puede provocar un agrietamiento y la rotura del filo.
- **Desgaste por difusión:** consiste en un intercambio de átomos entre la pieza a mecanizar y la herramienta. Está influido por las propiedades químicas del material de la herramienta y de sus recubrimientos, así como por su afinidad con el material de la pieza a mecanizar. Este fenómeno suele ser mayor cuanto más elevadas sean las temperaturas alcanzadas.

Todos estos fenómenos se dan conjuntamente, aunque dependiendo de las condiciones de trabajo y materiales de la pieza y herramienta, alguno de ellos predomina sobre los demás.

El análisis de la problemática relativa al desgaste de una fresa madre es muy complejo, aunque principalmente son dos los tipos de desgaste más importantes:



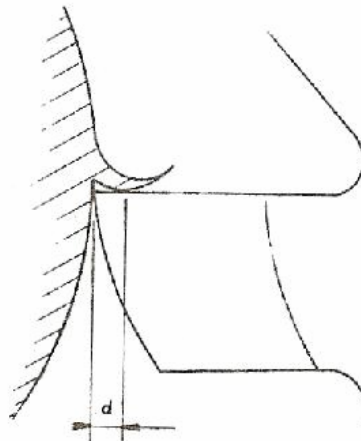
desgaste tipo cráter en la superficie de desprendimiento y desgaste tipo abrasivo sobre la superficie de incidencia.

A continuación se explican las causas de estos desgastes, centrando la atención en el caso de fresas madre de acero rápido con recubrimiento.

### 4.2.4.1 DESGASTE TIPO CRÁTER

El desgaste tipo cráter aparece en la superficie de desprendimiento, cerca del filo, en la zona donde la temperatura de la herramienta es máxima. Las dos principales causas son los fenómenos de desgaste por abrasión y por difusión.

El cráter es provocado por el desprendimiento de la viruta, cuyo punto de contacto con la herramienta no está en la arista de corte, sino que se encuentra en la cara de corte de los dientes de la fresa madre. Ver Figura 4.17.



**Figura 4.17:** Esquema del proceso de arranque de viruta por un diente de la fresa madre

En consecuencia, el centro del cráter estará a una cierta distancia "d" del filo de corte. Esta distancia depende de muchos elementos, como el ángulo de desprendimiento, la dureza del material que se está mecanizando, y sobre todo depende del espesor de viruta, ya que cuanto mayor sea éste, mayor será la presión que la viruta ejerce en la superficie de desprendimiento y en consecuencia mayor será la velocidad de formación del cráter.

El espesor de viruta será función del avance y demás características de la fresa madre, como el número de entradas o el número de aristas de corte. De forma



general puede decirse que el tamaño de viruta es directamente proporcional al avance por revolución e inversamente proporcional al número de estrías que interrumpen los filetes de la fresa madre (las cuales dan lugar a los filos de corte de la fresa). Por lo tanto, puede decirse que la causa más habitual de un elevado desgaste de cráter es un excesivo avance por revolución de la pieza de trabajo.

El mecanismo de formación del cráter es complejo. Simplificando se puede decir que ocurre en dos fases. Una primera fase en la cual parte de la viruta se suelda en la superficie de desprendimiento, gracias a la afinidad entre el material a mecanizar y el acero de la fresa madre. Este efecto de soldadura se produce con mayor facilidad cuanto mayor sea la presión que la viruta ejerce sobre la herramienta y cuanto mayor sea la temperatura en el punto de contacto. En la segunda fase este material soldado se separa de la superficie de desprendimiento, tomando con él partículas del material de la herramienta.

Especial importancia tiene la dureza del acero que constituye el filo de la herramienta, ya que influye en gran medida en la progresión del cráter. También es importante que este acero conserve sus propiedades al calentarse, ya que en el punto de contacto entre herramienta y pieza se alcanzan temperaturas superiores a los 600°C, facilitándose el fenómeno de difusión.

Para impedir este fenómeno suelen utilizarse fresas de aceros muy aleados, reduciendo así la afinidad química con el material de la pieza a mecanizar. Además se utilizan recubrimientos (principalmente TiN, TiAlN, TiCN y AlCrN), los cuales están formados por una película que se deposita en la superficie de la herramienta, y cuyo espesor suele ser de 6 a 9  $\mu\text{m}$ . Esta película es extremadamente dura, siendo capaz de mantener su dureza a temperaturas muy elevadas sin ninguna reacción química con el acero de la pieza que se mecaniza. De esta manera, se reduce la acumulación de material en la cara de corte de la herramienta, limitando en gran medida la formación de cráteres. Por ello es fundamental el recubrimiento de las fresas madre tras su afilado.

El cráter comienza a formarse alejado de la arista de corte, pero a medida que avanza se va haciendo más profundo y se va aproximando hacia dicha arista. De esta manera el filo se va debilitando pudiendo ocurrir una fractura o un mellado repentino del mismo. El avance debe controlarse para que el cráter se desarrolle dentro de unos límites admisibles evitando así la rotura del diente de la fresa

madre. (Anteriormente ya se comentó que la principal causa de un elevado desgaste de cráter es un excesivo avance por revolución de la pieza de trabajo).

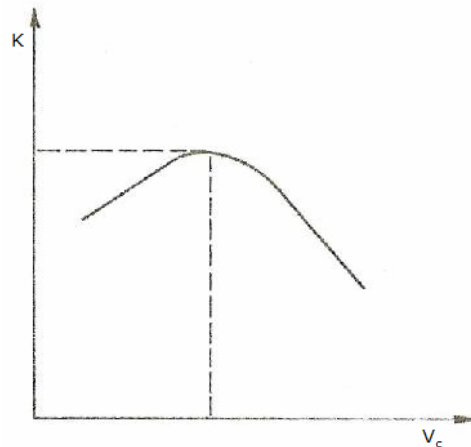


**Figura 4.18:** Desgaste de cráter sobre la superficie de incidencia de un diente de la fresa madre

Además del avance por revolución, la velocidad de corte juega un papel importante. A mayor velocidad de corte, se alcanzan mayores temperaturas en el punto de contacto entre herramienta y pieza. Pero este proceso no es tan simple como parece, ya que es necesario considerar dos fenómenos que en cierta medida reducen el riesgo de aumentar la velocidad de corte:

- El primero es que si la viruta es mecanizada a alta temperatura, ésta se vuelve más plástica y es más fácil de sacar, ejerciendo así menor presión en la superficie de la herramienta.
- El segundo es que si la viruta sale a una velocidad elevada, tendrá menos tiempo para transmitir calor a la herramienta, por lo que una gran cantidad del calor producido continúa en el interior de la viruta.

Estos fenómenos explican la sorprendente influencia que la velocidad de corte tiene sobre la actuación de la fresa madre. En la Figura 4.19 se muestra la curva obtenida al representar la velocidad de corte ( $V_c$ ) en el eje de abscisas y los metros de material cortado por diente (K) el eje de ordenadas.



**Figura 4.19:** Representación de los metros de material cortado ( $K$ ) en función de la velocidad de corte de la fresa madre ( $V_c$ )

Se puede observar que tan solo existe un óptimo en la velocidad de corte, el cual dependerá de muchos factores, como el tipo de material que se está mecanizando, el material del que está hecha la fresa madre, el avance por revolución de la pieza de trabajo, y muchos otros.

Este resultado va en contra del pensamiento generalizado de que una disminución de la velocidad de corte, se corresponde con una reducción en la formación del desgaste de cráter de la fresa madre, lo que se traduce en un aumento en la vida de la herramienta.

#### 4.2.4.2 DESGASTE TIPO ABRASIVO

Este tipo de desgaste, también se conoce como desgaste de flanco de incidencia, pero en el caso de las fresas madre, para no confundirlo con el desgaste producido en el lateral de diente (o flanco del diente) suele denominarse desgaste tipo abrasivo.

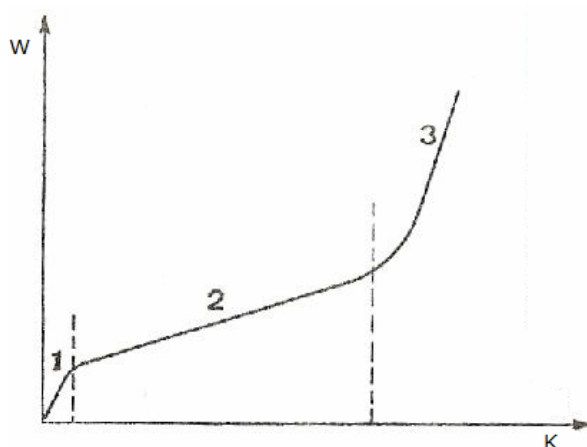
Este desgaste se produce en la superficie de incidencia, inmediatamente detrás del filo de corte, y es debido principalmente a fenómenos de desgaste por abrasión.

En una fresa madre el ángulo de incidencia suele ser pequeño, lo que provoca que cuando empieza a desgastarse y redondearse el filo de corte, la superficie que se encuentra tras él (superficie de incidencia) roza con la sección del engranaje que acaba de ser mecanizado, amplificándose de esta manera el desgaste.



El desgaste abrasivo es el modo de fallo deseado tras mecanizar un número sustancial de piezas, por ello es muy importante retirar la fresa madre de la máquina antes de que el nivel de desgaste aumente demasiado, ya que tras un cierto límite el desarrollo del desgaste abrasivo avanza de manera acelerada. Comúnmente este límite está entre 0,2 y 0,3 milímetros.

La evolución del desgaste tipo abrasivo ( $W$ ) en relación con los metros de engranaje mecanizado por la fresa madre ( $K$ ) está gobernada por la siguiente gráfica.



**Figura 4.20:** Representación del desgaste tipo abrasivo ( $W$ ) en función de los metros de engranaje mecanizados por la fresa madre ( $K$ )

La curva se divide en tres etapas. En la primera, el desgaste se incrementa rápidamente, en la segunda aumenta más lentamente y de forma proporcional a  $K$ , y en la última etapa el desgaste crece de manera exponencial. En consecuencia, la fresa madre debe ser retirada de la talladora antes de alcanzar la última parte de la curva.

El desgaste tipo abrasivo, a diferencia del desgaste de cráter, empeora al aumentar la velocidad de corte. Esto se debe al incremento de temperatura causado por la fricción, lo que provoca un rápido descenso de las propiedades de resistencia al desgaste por parte de la fresa madre, propiciando de esta manera un deterioro gradual del corte.

Al estar provocado este desgaste por la fricción entre herramienta y pieza, se puede decir de forma general, que cuantas más veces pasen los dientes de la fresa madre sobre la sección del engranaje que se está mecanizando, mayor será el



desgaste. Por lo tanto, si se reduce el avance por revolución, y en consecuencia se reduce el espesor de viruta, se producirá un mayor desgaste de tipo abrasivo.

En un primer momento, podría pensarse que reduciendo el volumen de material que cada diente extrae por revolución de la pieza (propiciado por una disminución del avance), la presión de corte se reduciría, se generaría menos calor y la presión en los dientes de la fresa y en consecuencia su desgaste también se reducirían. Sin embargo esto no es totalmente cierto, ya que si el avance por revolución se reduce, la distancia que los dientes recorren en contacto con la pieza de trabajo aumenta, ya que se incrementa el número de revoluciones que la fresa madre debe realizar para tallar el engranaje, y por lo tanto el efecto de la fricción entre la fresa madre y la pieza de trabajo llega a ser más dañino. En consecuencia al reducirse el avance por revolución, el desgaste tipo abrasivo se desarrolla más rápidamente.

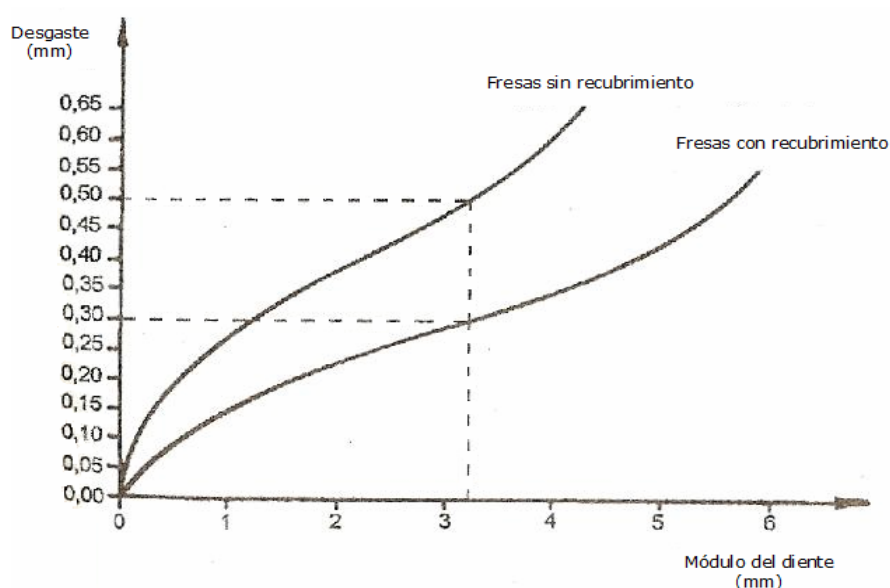
En fresas con recubrimiento podrían hacerse otras consideraciones para analizar la formación del desgaste tipo abrasivo. En la Figura 4.21 se puede observar como se ha producido un mellado en el filo de corte de una fresa madre con recubrimiento.



**Figura 4.21:** Mellado en el recubrimiento del filo de corte de un diente de la fresa madre

Este mellado al progresar deja desprotegido al sustrato, ya sea de acero rápido o de carburo. Esta es la clave de porqué el filo de corte suele ser ligeramente redondeado en fresas de carburos, ya que son bastante frágiles.

El desgaste admisible es bastante diferente si se comparan fresas recubiertas y fresas no recubiertas. Este fenómeno puede observarse en la Figura 4.22, en la cual se muestra la relación entre el desgaste crítico de tipo abrasivo en función del módulo del diente que se está tallando, comparando la evolución del desgaste en fresas madre con recubrimiento y sin recubrimiento.



**Figura 4.22:** Desgaste crítico de fresas madre en función del módulo del diente a tallar

En el anterior gráfico se observa que al tallar engranajes de acero con un módulo próximo a 3 milímetros, en el caso de utilizar una fresa no recubierta, es posible utilizarla hasta que la zona de máximo desgaste alcanza los 0.50mm sobre la superficie de incidencia, mientras que en el caso utilizar fresas recubiertas es recomendable sustituirlas cuando la zona de desgaste alcanza los 0.30mm sobre dicha superficie.

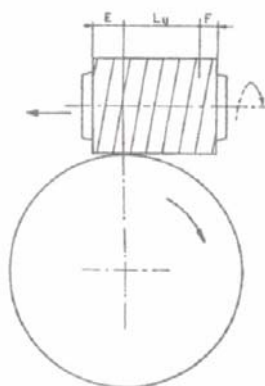
Por último se debe tener en cuenta la influencia que el diámetro exterior de la fresa tiene en el desgaste tipo abrasivo. A mayor diámetro de la fresa madre, mayor es el arco de contacto entre la pieza de trabajo y la fresa, es decir, el filo de corte está en contacto con la pieza de trabajo una longitud mayor. En consecuencia será mejor utilizar una fresa madre de pequeño diámetro para combatir el desgaste tipo abrasivo.

#### 4.2.5 SHIFTING Y AFILADO DE LA FRESA MADRE

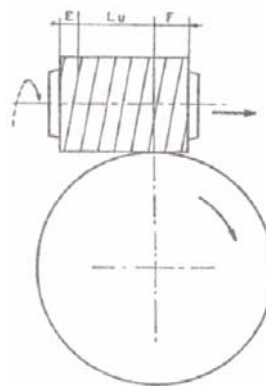
Tras haber tallado una o varias piezas, la fresa se mueve una cierta distancia en el sentido de su eje, realizando un movimiento denominado shifting. El objetivo de este movimiento axial es prolongar la vida útil de la fresa madre, de forma que el desgaste se distribuya de manera homogénea por todos sus dientes.



El shifting puede realizarse en la misma dirección o en dirección opuesta a la rotación de la pieza de trabajo. Si se realiza en la misma dirección la fresa se desgasta más lentamente pero el acabado del engranaje mecanizado es peor que si lo comparamos con el shifting en dirección opuesta al sentido de giro de la pieza de trabajo.



**Figura 4.23:** Shifting en dirección opuesta

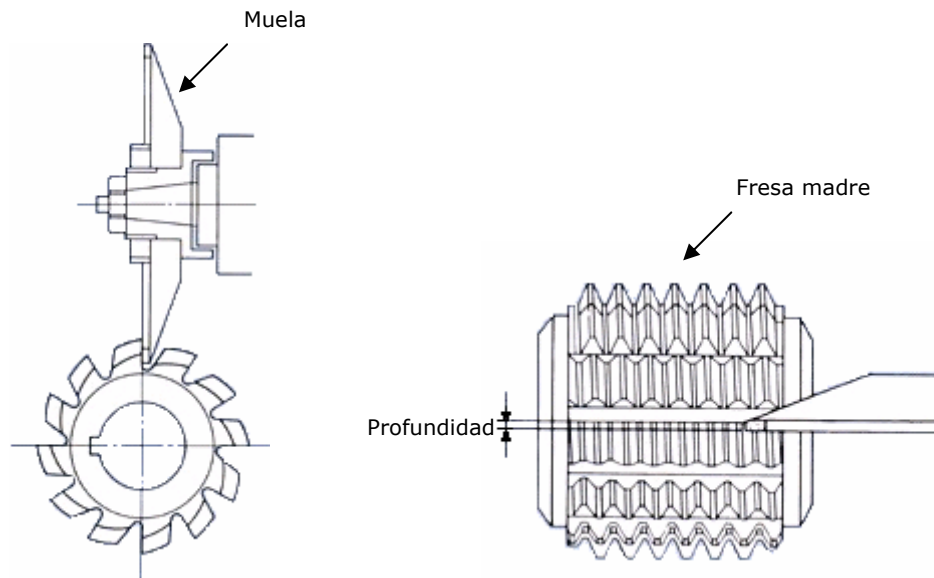


**Figura 4.24:** Shifting en la misma dirección

La importancia del desplazamiento de la fresa madre se hace notoria cuando ésta se retira de la máquina para su afilado. Si algunos de los dientes han sufrido mayor desgaste que otros, se tendrá que eliminar un material valioso de los dientes mejor conservados antes de poder afilar los dientes más desgastados.

El afilado de la fresa madre se lleva a cabo en una máquina específica denominada afiladora de fresas madre, la cual realiza un rectificado mediante una muela recubierta con polvo de diamante, realizando un movimiento alternativo a lo largo de cada ranura.

Este disco elimina la superficie de desprendimiento (la cual está afectada por el desgaste tipo cráter), eliminando el filo desgastado y parte de la superficie de incidencia, concretamente entre 0,2 y 0,3 milímetros en el caso de fresas recubiertas, tal y como se explicó en el apartado anterior. En la Figura 4.25 se puede observar como se realiza el afilado de una fresa madre.



**Figura 4.25:** Esquemas del funcionamiento de una muela afiladora de fresas madre

De esta manera se consiguen eliminar tanto el desgaste de cráter (que afectaba a la superficie de desprendimiento) como el desgaste de tipo abrasivo (que afectaba al filo y a la zona de la superficie de incidencia inmediatamente posterior a éste).



### 4.3 CONCLUSIONES

En este capítulo se describe el proceso de tallado por generación, que es el procedimiento más empleado para tallar engranajes, aunque también permite tallar estriados, tornillos sin fin, cremalleras, etc.

El objetivo de este proyecto es optimizar el proceso de tallado por generación mediante un sistema MQL, es por ello que este capítulo tiene gran importancia, ya que para lograrlo resulta fundamental realizar un estudio en profundidad de dicho proceso.

Para ello, en primer lugar se realiza una descripción de la herramienta usada en el proceso de tallado por generación, la fresa madre. Esta herramienta es básicamente un tornillo sin fin con los filetes interrumpidos por ranuras longitudinales, lo que da origen a los dientes donde se encuentran las aristas de corte.

Para tallar un engranaje, el disco de partida y la fresa madre giran con una relación de transmisión, de forma que el engranaje gira un espacio interdental por cada rotación de la fresa. Además en función de la inclinación de la fresa madre, se pueden mecanizar engranajes rectos o con un determinado ángulo de hélice.

En este capítulo, también se describe como calcular los parámetros y tiempos de corte de este proceso de mecanizado. Además se muestra cual es la geometría de corte de una fresa madre, explicando cuales son los ángulos de incidencia, desprendimiento y de arista, así como las superficies que los forman.

Otro punto fundamental de este capítulo, consiste en analizar cuales son los desgastes que se producen en una fresa madre. Para ello se realiza un estudio en profundidad de los principales mecanismos de formación, tanto del desgaste de cráter, como del desgaste tipo abrasivo. Este análisis que está enfocado hacia el caso de fresas madre de acero rápido con recubrimiento, resulta crucial para poder optimizar el proceso de tallado por generación.

En relación con el desgaste de la fresa madre, tiene especial importancia el shifting. Este es el nombre que recibe el desplazamiento que realiza la fresa, para que todos sus dientes se desgasten de manera homogénea.



Para concluir el capítulo, se describe el proceso de afilado de una fresa madre, para lo cual se utiliza un disco de diamante que elimina el filo desgastado y la cara de corte de los dientes de la fresa.



# *CAPÍTULO 5:*

# *LUBRICACIÓN Y REFRIGERACIÓN*





## 5. LUBRICACIÓN Y REFRIGERACIÓN

### 5.1 INTRODUCCIÓN

En los procesos de mecanizado se genera gran cantidad de calor, debido principalmente a la intensa deformación plástica del metal originada en la zona de cizalladura, y a la fricción de la viruta cuando se desliza sobre la superficie de desprendimiento de la herramienta. Estas condiciones de fricción y temperatura provocan el desgaste de la herramienta, dando como resultado un pobre acabado superficial y un trabajo impreciso.

Para reducir los efectos negativos del calor y la fricción sobre las herramientas y piezas, en la mayoría de las operaciones de mecanizado se aplican fluidos de corte. De esta forma, parte del calor generado se disipa a través del ambiente y del fluido de corte, siendo el calor restante evacuado en su mayoría por la viruta, aunque también la herramienta y la pieza que está siendo mecanizada evacúan parte de este calor.

### 5.2 FLUIDOS DE CORTE

Los fluidos de corte son productos industriales regulados por la norma ISO 6743/7-1986 (E), que los cataloga como productos industriales ISO-L-M (M: Familia "Metalworking"), (L: Clase "Lubricants"). La mencionada norma divide los fluidos en dos categorías: MH o Aceites íntegros y MA o Fluidos acuosos.

Los fluidos de corte se utilizan en la mayoría de las operaciones de mecanizado por arranque de viruta para lubricar y refrigerar, tanto la herramienta como la pieza. Estos fluidos son aceites, emulsiones y soluciones con aditivos que añaden ciertas propiedades necesarias para el mecanizado.

La forma más extendida de aplicación del fluido de corte es hacer incidir un chorro abundante y continuo dirigido hacia el punto de contacto entre la herramienta, la pieza y la viruta.



Con una eficaz lubricación y refrigeración se puede conseguir:

- Aumentar la productividad, al aumentar la velocidad de corte.
- Alargar la vida de herramienta, al reducir su desgaste.
- Un mejor acabado y control dimensional de la superficie mecanizada.

### 5.2.1 TIPOS DE FLUIDOS DE CORTE

Los principales tipos de fluidos de corte utilizados para el mecanizado son:

- Los aceite íntegros.
- Las emulsiones oleosas.
- Las soluciones semisintéticas.
- Las soluciones sintéticas.

Los tres últimos tipos son soluciones acuosas diluidas al 3,5% como media, y reciben el nombre genérico de taladrinas. Los aceites íntegros también se conocen con el nombre de aceites de corte.

#### 5.2.1.1 ACEITES DE CORTE

Son fluidos de corte no acuosos, constituidos principalmente por aceites minerales a los que se les aportan aditivos que les proporcionan ciertas propiedades, siendo los más utilizados los aditivos de extrema presión. Estos lubricantes no acuosos (no se diluyen para su utilización), carecen de un elevado poder de refrigeración, pero son muy efectivos en relación con la reducción de la fricción y del desgaste abrasivo. Se utilizan fundamentalmente en operaciones de mecanizado severas en las que se generan grandes cantidades de viruta.



### 5.2.1.2 TALADRINAS

Con el nombre genérico de taladrina se hace referencia a diferentes tipos de soluciones acuosas con aditivos de extrema presión, emulsionantes, antioxidantes, inhibidores de corrosión, bactericidas, humectantes, antiespumantes, colorantes, etc. Se pueden dividir en tres tipos:

- a) **Emulsiones de aceite:** Una emulsión es una mezcla de dos líquidos inmiscibles, en este caso agua y aceite. El concentrado se diluye al 4% como media (entre 2,5% y 15% según la clase) y contiene como base un 60% de aceites minerales, aproximadamente un 20% de emulgentes, un 10% de agua y un 10% de aditivos varios (anticorrosivos, bactericidas y aditivos de extrema presión). Este tipo de fluido de corte presenta un aspecto lechoso, es el más empleado y es especialmente adecuado para operaciones de mecanizado medio y ligero.
- b) **Taladrinas semisintéticas:** El concentrado se diluye al 4% como media (entre el 1,5% y 5%) y contiene como base cerca de 20% de aceite mineral o sintético, un 30% de emulgentes, un 40% de agua y un 10% de aditivos varios (humectantes, inhibidores de oxidación y bactericidas). Son traslúcidas volviéndose con el tiempo opacas.
- c) **Taladrinas sintéticas:** El concentrado se diluye al 2,5% (entre el 1,5 y el 12%) en agua y contiene 15% de anticorrosivos, hasta un 25% de humectantes, un 10% de aditivos varios y un 50% de agua. A diferencia de las semisintéticas no incluyen aceite. Forman disoluciones traslúcidas. Sus funciones principalmente son la refrigeración y la protección antioxidante.

### 5.2.2 FUNCIONES DE LOS FLUIDOS DE CORTE

Las principales funciones de los fluido de corte son las siguientes:

- **Lubricación:** reducir la fricción entre la herramienta y la pieza, y entre la herramienta y la viruta que está siendo arrancada. De esta manera se consigue una mayor vida de herramienta, un mejor acabado superficial y una disminución en el consumo de energía.



- Refrigeración: el fluido de corte debe evacuar parte del calor generado en la operación de mecanizado, protegiendo así a la pieza y a la herramienta de temperaturas excesivamente altas. Por ello, el fluido debe poseer un elevado calor específico y una elevada conductividad térmica.
- Evacuación de viruta: el fluido debe retirar eficazmente la viruta lejos de la zona de operación para evitar que interfiera en el proceso, permitiendo que se alcance la calidad superficial requerida.
- Protección frente a la corrosión: en caso de utilizarse un fluido acuoso se podría oxidar y corroer la pieza, la herramienta o la máquina. Para evitarlo los fluidos de corte llevan aditivos que protegen frente a la corrosión.

### 5.2.3 ELECCIÓN DE LOS FLUIDOS DE CORTE

Esta elección debe basarse en criterios que dependen de diversos factores:

- El tipo de operación de mecanizado que se realice, así como las condiciones de dicha operación, principalmente los parámetros de corte.
- El material de la pieza a mecanizar.
- El material que constituye la herramienta de corte.

De manera general para seleccionar un fluido de corte, lo primero que se debe tener en cuenta es si la función principal del fluido debe ser lubricar o refrigerar. De esta forma, cuando lo primordial es refrigerar se utilizan taladras (suele ocurrir cuando el arranque de material es relativamente pequeño, pero con una velocidad de corte considerable, originando de este modo altas temperaturas). En cambio cuando lo más importante es la lubricación suelen utilizarse aceites de corte (ocurre cuando el desprendimiento de material es considerable y la velocidad de corte es relativamente pequeña, siendo el principal problema a resolver la disminución de los rozamientos generados por el desprendimiento de viruta).

Durante el proceso de selección del fluido de corte apropiado para una máquina-herramienta determinada, el fabricante de ésta suele recomendar un modelo



concreto de aceite de corte o de taladrina, con unas propiedades determinadas que optimizan el proceso de mecanizado de dicha máquina-herramienta.

### 5.2.4 INCONVENIENTES DEL USO DE LOS FLUIDOS DE CORTE

Los principales inconvenientes de utilizar fluidos de corte son los siguientes:

- Pueden tener efectos muy negativos sobre el medio ambiente, debido fundamentalmente a la problemática que plantean las emisiones a la atmósfera de productos agresivos, procedentes de la incineración de residuos aceitosos conteniendo cloro orgánico (lluvia ácida, deterioro de la capa de ozono, etc.) y los vertidos de aguas residuales conteniendo restos de derivados fenólicos que pueden contaminar un ecosistema.
- Pueden ser causa de riesgo para la salud del operario, ya que la manipulación de aceites y taladrinas puede provocar afecciones cutáneas, respiratorias y cáncer. Las afecciones cutáneas son el riesgo más extendido, y se deben a la naturaleza irritante de muchas de las sustancias que integran su formulación. La descomposición térmica de estos fluidos durante el mecanizado origina la formación de aerosoles y nieblas, cuya inhalación puede ocasionar irritación de las vías respiratorias, neumonía lipoide, fibrosis pulmonar, asma bronquial, etc. Además ciertas sustancias que componen estos fluidos, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y las N-nitrosaminas provocan que los fluidos de corte tengan cierto potencial cancerígeno.
- Pueden ocasionar, bajo ciertas condiciones, efectos negativos en la producción. Esto se debe a que la composición de dichos fluidos puede sufrir alteraciones por el estrés mecánico y térmico, así como por sustancias contaminantes que afecten a los aditivos del fluido de corte. De esta manera se modifican las propiedades iniciales del fluido, provocando una disminución de la calidad superficial de las piezas mecanizadas, elevado desgaste de la herramienta, corrosión, etc.
- Generan unos costes elevados como consecuencia de la adquisición, almacenamiento, mantenimiento y eliminación de residuos. De acuerdo con diferentes estudios realizados en la industria del automóvil, los costes



asociados a los fluidos de corte rondan entre el 7 y el 17% del coste final de producción, siendo varias veces superior al coste de herramienta.

### 5.2.5 GESTIÓN DE LOS FLUIDOS DE CORTE

Para que los fluidos de corte pasen a ser residuos y por lo tanto un problema medioambiental, han de pasar por un proceso de agotamiento. Un fluido de corte se considera agotado cuando su composición inicial ha sufrido alteraciones, principalmente una disminución de la concentración de los aditivos, por lo que pierde sus propiedades iniciales, reflejándose en una disminución de la calidad superficial de las piezas mecanizadas, pérdida de precisión, corrosión de las herramientas, etc. Cuando esto ocurre, es necesario reemplazar el fluido de corte por otro nuevo.

El proceso de agotamiento se produce principalmente por el estrés mecánico y térmico de las taladrinas debido al mecanizado, y por la acumulación de sustancias contaminantes. Estos contaminantes suelen ser aceites parásitos, como por ejemplo fluidos hidráulicos perdidos a través de fugas, restos de otros fluidos de corte, etc. Aunque también pueden ser bacterias o virutas presentes en el fluido de corte.

Las empresas de mecanizado deben realizar periódicamente, controles a los fluidos de corte para comprobar que no hayan perdido sus propiedades iniciales. La periodicidad de estos controles depende del tamaño de la empresa, volumen de mecanizado, etc. Habitualmente estos controles son realizados por la propia empresa suministradora de estos fluidos.

Debido a la posible toxicidad y escasa biodegradabilidad de estos residuos, la legislación española vigente clasifica a los fluidos de corte agotados como residuos peligrosos y exige que sean gestionados como tales. Por ello requieren una gestión medioambientalmente adecuada, que realizan empresas especializadas. Las medidas basadas en acciones correctoras y preventivas, la recuperación y el reciclado, son los métodos más apropiados para su gestión.

Además de su agotamiento, debe considerarse el impacto ambiental producido por fugas en el sistema de suministro del fluido de corte, arrastres en piezas y virutas, salpicaduras debido a la elevada velocidad de corte y nieblas generados



durante el mecanizado. Estas causas además de la problemática medioambiental directa, suponen un despilfarro de fluido de corte y por lo tanto un problema económico.

Debido a los numerosos problemas técnicos, económicos y medioambientales que conlleva la utilización de estos fluidos, resulta interesante el estudio de tecnologías que sustituyan a las taladrinas y aceites de corte convencionales.

### **5.3 ALTERNATIVAS A LA UTILIZACIÓN DE FLUIDO DE CORTE CONVENCIONAL**

El desarrollo de nuevas técnicas de refrigeración y lubricación que reducen el consumo del fluido de corte, así como la utilización de nuevos fluidos de corte biodegradables, es un tema prioritario de investigación en países, cuyas industrias han de afrontar elevados costes de gestión de los residuos en los procesos de fabricación con fluidos de corte convencionales.

Debido a los problemas ambientales y de salud para los operarios en contacto con los fluidos de corte, se viene prestando especial atención a la reducción, o incluso eliminación de los fluidos de corte de los procesos productivos, tendiendo a reemplazar sus bases lubricantes por otras biodegradables, no tóxicas y respetuosas con el medio ambiente.

Principalmente existen dos alternativas a la utilización de los fluidos de corte convencionales, que son:

- Mecanizado en seco
- Mecanizado con mínima cantidad de lubricante (MQL)

#### **5.3.1 MECANIZADO EN SECO**

El mecanizado en seco supone la eliminación completa del fluido de corte, presentando por ello numerosas ventajas frente al mecanizado en húmedo (con fluido de corte convencional). Estas ventajas consisten en la eliminación de costes relacionados con la adquisición, mantenimiento y reciclaje del fluido de corte,



además de eliminar los problemas ambientales y de salud producidos por dicho fluido.

Pero también conlleva una serie de inconvenientes, ya que la eliminación total del refrigerante provoca que la energía mecánica introducida en el proceso de corte se transforme casi íntegramente en calor. Mientras que en el mecanizado con fluido de corte la mayor parte del calor generado es absorbido y extraído por el refrigerante, en el mecanizado en seco, la herramienta, la pieza y la máquina absorben este calor soportando elevadas temperaturas. Esto afecta negativamente a la vida de la herramienta y a la precisión dimensional de la pieza. Además la ausencia de fluido de corte, provoca problemas con la evacuación de viruta, así como en la limpieza de la pieza, ya que éstas también son funciones de dicho fluido.

El material de la herramienta debe presentar baja tendencia a la adhesión con el material de la pieza, así como elevada dureza y resistencia al desgaste a alta temperatura. Los avances en el campo de los materiales de corte están contribuyendo a la eliminación de los fluidos de corte. También las máquinas-herramienta se están desarrollando a favor del mecanizado en seco.

Para implantar el mecanizado en seco, es necesario un profundo análisis de las condiciones límites de la operación, así como el conocimiento detallado de las complejas interacciones producidas en el proceso entre la herramienta de corte, la pieza a mecanizar y la máquina herramienta. Resulta esencial diseñar el proceso de corte de forma que se minimice la cantidad de calor transferido a la pieza, ya que de esto depende la precisión alcanzable en condiciones de mecanizado en seco.

### **5.3.2 MECANIZADO CON MÍNIMA CANTIDAD DE LUBRICANTE (MQL)**

A pesar de los avances obtenidos en el campo del mecanizado en seco, los fluidos de corte resultan todavía esenciales en muchas operaciones de mecanizado para garantizar la vida de la herramienta y la requerida calidad superficial. De esta manera, donde no parece viable renunciar a ellos, se plantea la utilización de sistemas alternativos de mínima lubricación con fluidos de corte no contaminantes.

Mientras que en la lubricación convencional se produce una inundación con fluido de corte en la zona de mecanizado, los sistemas MQL (Minimum Quantity of





Lubrication), humedecen estrictamente la zona de corte (herramienta-pieza-viruta) con muy poca cantidad de lubricante. Principalmente existen tres tipos de sistemas MQL en función del tipo de fluido de corte utilizado, caudal suministrado y tecnología empleada en el suministro:

- Sistemas de pulverizado a baja presión, en los que el fluido de corte se introduce en una corriente de aire a baja presión, y se transmite a la zona de contacto entre herramienta y pieza en forma de mezcla. El caudal del fluido de corte varía entre 10 y 1000 ml/h, siendo éste de escasa viscosidad, utilizándose principalmente emulsiones acuosas que pueden producir nieblas. Además se caracterizan por una escasa precisión en el grado de dosificación.
- Sistemas de inyección sin aire, que utilizan bombas dosificadoras, las cuales mediante pulsos, suministran una cantidad determinada de fluido de corte. La cantidad suministrada varía entre 0,01 y 1 ml/ciclo, siendo la dosificación precisa. Además, al no usar aire se evita la formación de nieblas. Suelen utilizarse en procesos discontinuos.
- Sistemas de pulverizado a alta presión. El aire comprimido presuriza el depósito del lubricante, como consecuencia de lo cual se transporta aire y lubricante, bien por tubos separados hasta una boquilla donde se produce la mezcla, o bien a través de un único conducto. El primer caso suele utilizarse para lubricación externa de herramientas, mientras que el segundo caso tiene mayor aplicación en la lubricación interna de las mismas. La mezcla de aire y lubricante se puede ajustar de forma independiente para optimizar el proceso de mecanizado, alcanzándose un grado de dosificación de elevada precisión. La cantidad suministrada de lubricante es extremadamente baja, estando comprendida entre 5 y 100 ml/h. Pueden emplearse emulsiones acuosas, pero se recomienda utilizar aceites de elevada viscosidad.

Éste último tipo de MQL es el que presenta mayores ventajas, por tener el menor consumo de lubricante, representando un paso intermedio entre el mecanizado en seco y la lubricación convencional. Además se pueden utilizar aceites de corte biodegradables. Es por esto que de aquí en adelante, al hablar de sistema MQL se estará haciendo referencia a esta clase de dispositivo.



### 5.4 MQL: SISTEMA DE LUBRICACIÓN POR CANTIDADES MÍNIMAS

Un cambio en la conciencia medioambiental y la necesaria disminución de los costes de producción han obligado a las industrias de mecanizado a plantearse el uso de lubricantes y refrigerantes convencionales.

Al utilizar el sistema MQL se consigue una lubricación eficiente, sin derrochar lubricante, contribuyendo a proteger la salud de los operarios y el medio ambiente. Además se pueden reducir significativamente los costes relacionados con el fluido de corte, que pueden ser varias veces superiores a los costes de herramienta. De esta manera se evitan los problemas económicos y ecológicos que conlleva el mecanizado con lubricación convencional.

En la lubricación por cantidades mínimas, una corriente de aire que contiene gotas de aceite finamente dispersas lubrica la zona de contacto entre pieza y herramienta. Gracias al pequeño tamaño de las gotas de aceite, inferiores a 1  $\mu\text{m}$ , éstas apenas tienen inercia y velocidad de caída. Esto hace posible el transporte del aerosol a distancias largas, a través de fuertes depresiones o de husillos que giran a gran velocidad sin una notable separación de la mezcla, de tal forma que todas las partículas de lubricante se pueden aplicar sobre el filo de corte de la herramienta.

Con el método MQL, se puede conseguir una lubricación eficaz en el proceso de corte utilizando cantidades extraordinariamente pequeñas de aceite. También puede conseguirse mayor productividad que con los fluidos de corte convencionales, ya que en determinados procesos permite trabajar con parámetros de corte más altos.

En cuanto a la refrigeración, el aerosol producido por el sistema MQL elimina el calor generado, tanto por convección gracias al aire inyectado, como por la evaporación de parte del aceite contenido en dicho aerosol.

Además de refrigerar, se reduce el rozamiento en la superficie de incidencia y en la de desprendimiento, gracias al reducido tamaño de las gotas de aceite que pueden actuar entre herramienta y pieza, y entre viruta y herramienta. Al utilizar el



sistema MQL, se alcanza un elevado grado de humidificación gracias al pequeño tamaño de las partículas de aceite generadas y a su distribución homogénea en el aerosol.

Pero la puesta en práctica del sistema de lubricación por cantidades mínimas no consiste simplemente en reducir la cantidad de fluido de corte, ya que éste lleva a cabo importantes funciones durante el mecanizado que habrá que suplir de alguna manera. Los fluidos de corte convencionales tienen como funciones principales la refrigeración y lubricación de la pieza y la herramienta, pero también realizan otras funciones secundarias como evacuación de viruta, mantenimiento uniforme de la temperatura en la pieza de trabajo, proporcionar buen acabado, etc.

Por estos motivos, antes de implantar un sistema de lubricación por cantidades mínimas de forma segura y económica, es necesario realizar un profundo estudio del proceso de mecanizado en cuestión. Es por ello que los responsables de aceptar esta tecnología e implantarla en sus empresas, necesitan tener previamente soluciones evidentes y fiables que demuestren la superioridad de esta tecnología sobre la convencional.

### 5.4.1 VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL SISTEMA MQL FRENTE AL FLUIDO DE CORTE CONVENCIONAL

Las principales ventajas de los sistemas de lubricación por cantidades mínimas son:

- **Reducción de costes:**
  - Reducción del consumo del fluido de corte hasta en un 95%. Ésta es la principal ventaja del sistema MQL. Se consiguen reducir de esta manera los costes de adquisición, almacenamiento, mantenimiento y eliminación de dicho fluido.
  - Las piezas mecanizadas se encuentran prácticamente secas, por lo que en muchos casos no es necesaria una posterior operación de limpieza.



- El contenido de aceite residual en la viruta es muy bajo, reduciendo el coste de su eliminación.
- El aceite utilizado en el sistema MQL no se recircula, por lo que no es necesaria la utilización de filtros para el aceite, ni de bombas, reduciéndose por tanto el consumo de electricidad.
- **Mayor productividad:**
  - En algunas operaciones de mecanizado, puede lograrse una reducción del tiempo de producción al permitir utilizar mayores parámetros de corte. También se puede conseguir un aumento en la vida de la herramienta. De esta manera se puede alcanzar una mayor eficiencia en el mecanizado.
- **Ventajas tecnológicas:**
  - El aire comprimido junto con las partículas de aceite, es proyectado únicamente a la zona de contacto pieza-herramienta con control directo de caudal.
  - El lubricante pulverizado no es rechazado por la fuerza centrífuga generada por la herramienta o la pieza, al contrario que en sistemas de circuito cerrado, donde actúan grandes caudales que se dispersan rápidamente.
  - Las gotas proyectadas se vaporizan en la zona de contacto, y el calor que se desprende del proceso se evacua en forma de calor.
  - Debido al pequeño tamaño de las partículas de lubricante, éstas llegan a puntos difícilmente accesibles de la pieza a mecanizar.
  - Es posible su utilización en paralelo con fluidos de corte convencionales, y con mecanizado en seco.
- **Medio ambiente:**
  - Reducción del impacto ambiental como consecuencia de la disminución de residuos resultantes del aceite de corte.



- Con la eliminación de nieblas, fugas y salpicaduras de aceite se mejora el entorno de trabajo y la salud de los operarios.

Pero a pesar de todas estas ventajas, el sistema de lubricación MQL presenta algunos inconvenientes frente al sistema de lubricación convencional:

- El sistema MQL dota a la zona de corte de una buena lubricación, pero la refrigeración de la pieza-herramienta no es tan eficaz como con el fluido de corte convencional, exigiendo el desarrollo de nuevos recubrimientos, herramientas y estrategias de mecanizado para garantizar la estabilidad térmica y mecánica del conjunto máquina-herramienta-pieza.
- Al utilizar el fluido de corte convencional, éste es el encargado de transportar la viruta, por ello al reducirse considerablemente el flujo del lubricante utilizado, existen problemas con la evacuación de la misma.
- La variedad de sistemas MQL existentes en el mercado, hace necesaria la realización de estudios, analizando la compatibilidad de éstos con la máquina y operación de mecanizado a realizar.
- Es necesaria la conexión de una toma de aire comprimido, así como la instalación de dosificadores o boquillas especiales en la máquina.

### 5.4.2 LUBRICACIÓN POR CANTIDADES MÍNIMAS INTERNA Y EXTERNA

La lubricación por cantidades mínimas puede ser interna, en la cual el lubricante fluye a través de orificios a modo de canales incorporados en la propia herramienta, o externa, utilizando boquillas que se instalan en la máquina orientadas hacia la herramienta.

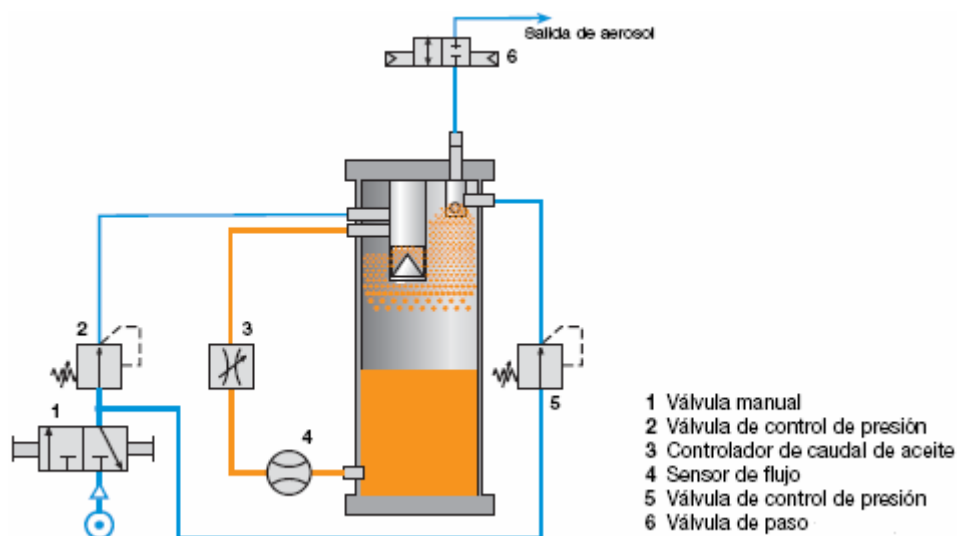
En el caso de la lubricación interna hay que distinguir entre los sistemas de un canal y los sistemas de dos canales. En los sistemas de un canal, el aerosol se produce en el depósito del equipo MQL, a partir de lubricante y aire comprimido, para ser transportado por un único conducto hasta la herramienta a través del husillo y el portaherramientas. En cambio, en los sistemas de dos canales el aceite

y el aire se transportan de forma independiente hasta la herramienta, donde se produce la mezcla dando lugar al aerosol.

Los sistemas de un canal (Figura 5.1) son más eficaces, debido a que trabajan con mayores presiones, de forma que permiten la formación de partículas de aceite de menor tamaño, pudiendo ser éstas inferiores a  $0,5 \mu\text{m}$ .

El sistema de lubricación interna es idóneo para operaciones de escariado y taladrado en profundidad, ya que asegura la presencia de lubricante en la zona de corte, al llegar a través de la herramienta. Por el mismo motivo, esta técnica es también apropiada para operaciones con herramientas de pequeño tamaño que trabajan a alta velocidad de corte.

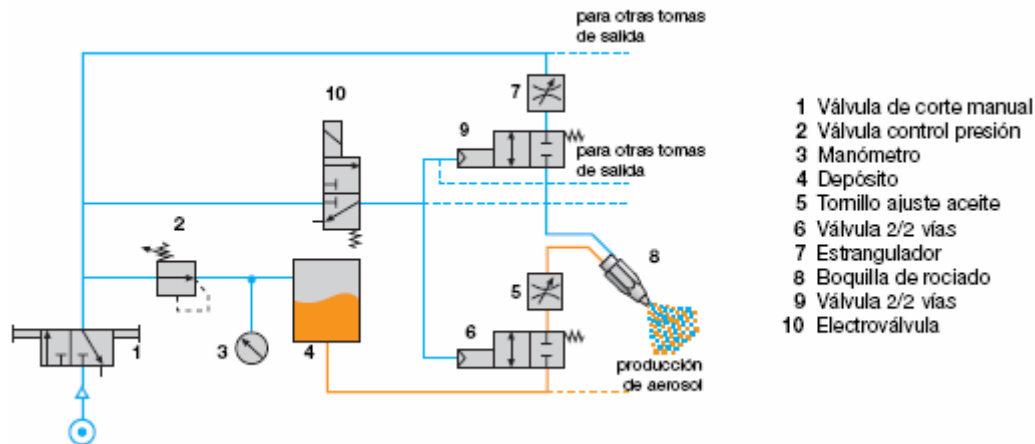
Otras ventajas adicionales de la lubricación interna se sustentan en la ausencia de errores por la posición de las boquillas, así como la posibilidad de integrar esta tecnología sin tener que utilizar tuberías ni accesorios externos que puedan resultar incómodos en la zona de trabajo.



**Figura 5.1:** Diseño de un sistema de lubricación por cantidades mínimas interno de un canal

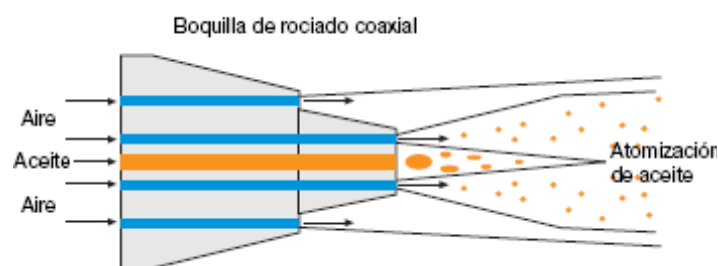
En el caso de la lubricación externa (Figura 5.2), el sistema MQL consiste en un depósito de lubricante, una o varias unidades de regulación de mezcla y conductos con boquillas de rociado. El aire comprimido con el que se alimenta el sistema presuriza el depósito de lubricante, como consecuencia de lo cual el lubricante es transportado a través de un sistema de conductos hasta las boquillas de rociado. La regulación de las cantidades requeridas de lubricante y aire, así como el ajuste de

la presión interna del depósito de lubricante se realizan por medio de válvulas de control, situadas normalmente en dicho depósito. El lubricante y el aire son transportados de forma separada a través de tubos coaxiales hasta la boquilla de rociado, lugar donde se produce la mezcla y la atomización del lubricante.



**Figura 5.2:** Diseño de un sistema de lubricación por cantidades mínimas externo

A diferencia de los sistemas de lubricación internos, en los sistemas externos el aerosol se genera en la salida de la boquilla por efecto Venturi. El aire arrastra y acelera el lubricante, obteniéndose partículas extraordinariamente finas de aceite. El flujo concéntrico de aceite y aire que resulta de este diseño provoca que el aerosol sea conducido con gran exactitud hasta el punto deseado.



**Figura 5.3:** Atomización en gotas microscópicas por medio de una boquilla de tipo coaxial

La principal ventaja de los sistemas de lubricación externos es que puede adecuarse con facilidad a máquinas-herramientas convencionales, pudiendo utilizarse en gran cantidad de operaciones, tales como torneado, taladrado, fresado, escariado, brochado o roscado. Además permiten trabajar con numerosas boquillas simultáneamente, orientándolas de manera que se minimice el desgaste de la herramienta.



Sin embargo presenta ciertos inconvenientes en aquellas máquinas-herramienta en las que se realizan operaciones con herramientas de distinto diámetro y longitud, teniendo que recolocar las boquillas manualmente, o bien con la asistencia de algún sistema acoplado a la máquina que permita corregir la posición de las mismas.

### 5.4.3 LUBRICANTES PARA MQL

Los lubricantes utilizados en los sistemas MQL tienen unas características físicas y químicas especialmente desarrolladas para conseguir un óptimo funcionamiento de este tipo de tecnología. Por ello, el fabricante del MQL recomienda el uso de uno o varios lubricantes, no haciéndose responsable en muchas ocasiones, de los problemas originados por el uso de otro tipo de lubricantes.

Especial importancia tiene el hecho de que estos lubricantes sean biodegradables, siendo por tanto más respetuosos con el medio ambiente que los fluidos de corte convencionales. Esto se debe que los lubricantes diseñados para funcionar con MQL están formulados en base a un aceite vegetal, mientras que los fluidos de corte convencionales se encuentran formulados en base a un aceite mineral.

Además de ser biodegradables, estos lubricantes deben tener una elevada viscosidad, así como elevada resistencia a la oxidación, ya que al adherirse a las superficies de la pieza y la herramienta deben soportar elevadas temperaturas durante un tiempo prolongado.

Por todos estos motivos, los lubricantes utilizados en los sistemas MQL suelen tener un precio varias veces superior a un aceite de corte convencional.

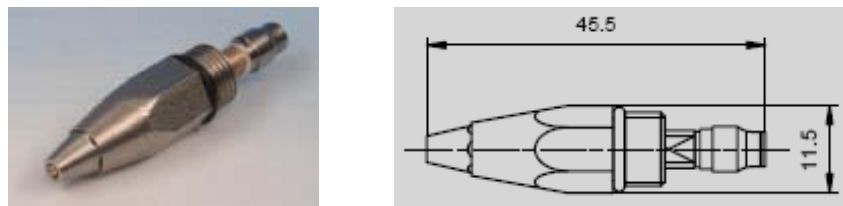
## 5.5 SISTEMA LUBRILEAN BASIC

Para llevar a cabo este proyecto se utiliza un sistema MQL externo, concretamente el modelo Lubrilean Basic, de la marca Vogel. Este dispositivo de lubricación por cantidades mínimas consiste básicamente en un depósito de aceite, el cual se encuentra presurizado, una electroválvula que debe conectarse al PLC de la máquina, de forma que al recibir una señal de 24 V permite que el MQL comience



a funcionar, y 4 boquillas de rociado de lubricante conectadas al depósito a través de unos tubos, los cuales permiten transportar de forma independiente aire y aceite.

El caudal de aire y aceite se puede regular a través de dos válvulas por boquilla, de forma que estos flujos se pueden ajustar de manera independiente para cada una de las cuatro boquillas.



**Figura 5.4:** Boquillas utilizadas en el dispositivo Lubrilean Basic

A la salida del depósito del MQL, se transporta el aceite por un tubo de 2 milímetros de diámetro, el cual va montado de forma coaxial en el interior de un tubo de mayor diámetro por donde se transporta aire. Estos dos tubos coaxiales (a simple vista parece un único tubo) van conectados a cada una de las boquillas donde se produce la mezcla aire-aceite por efecto Venturi. Aunque en este caso se dispone de 4 boquillas de rociado, el sistema Lubrilean Basic puede incluir hasta un máximo de 8 boquillas, si el tipo de operación de mecanizado lo requiere.

Este modelo también dispone de un sensor de nivel mínimo, que debe ir conectado al PLC de la máquina, indicando de manera oportuna si el nivel de aceite en el depósito es bajo, de manera que se pueden evitar los daños producidos en la herramienta al mecanizar en seco.

A continuación se muestran los planos del sistema Lubrilean Basic de Vogel, indicando sus componentes más importantes, así como su esquema hidráulico.

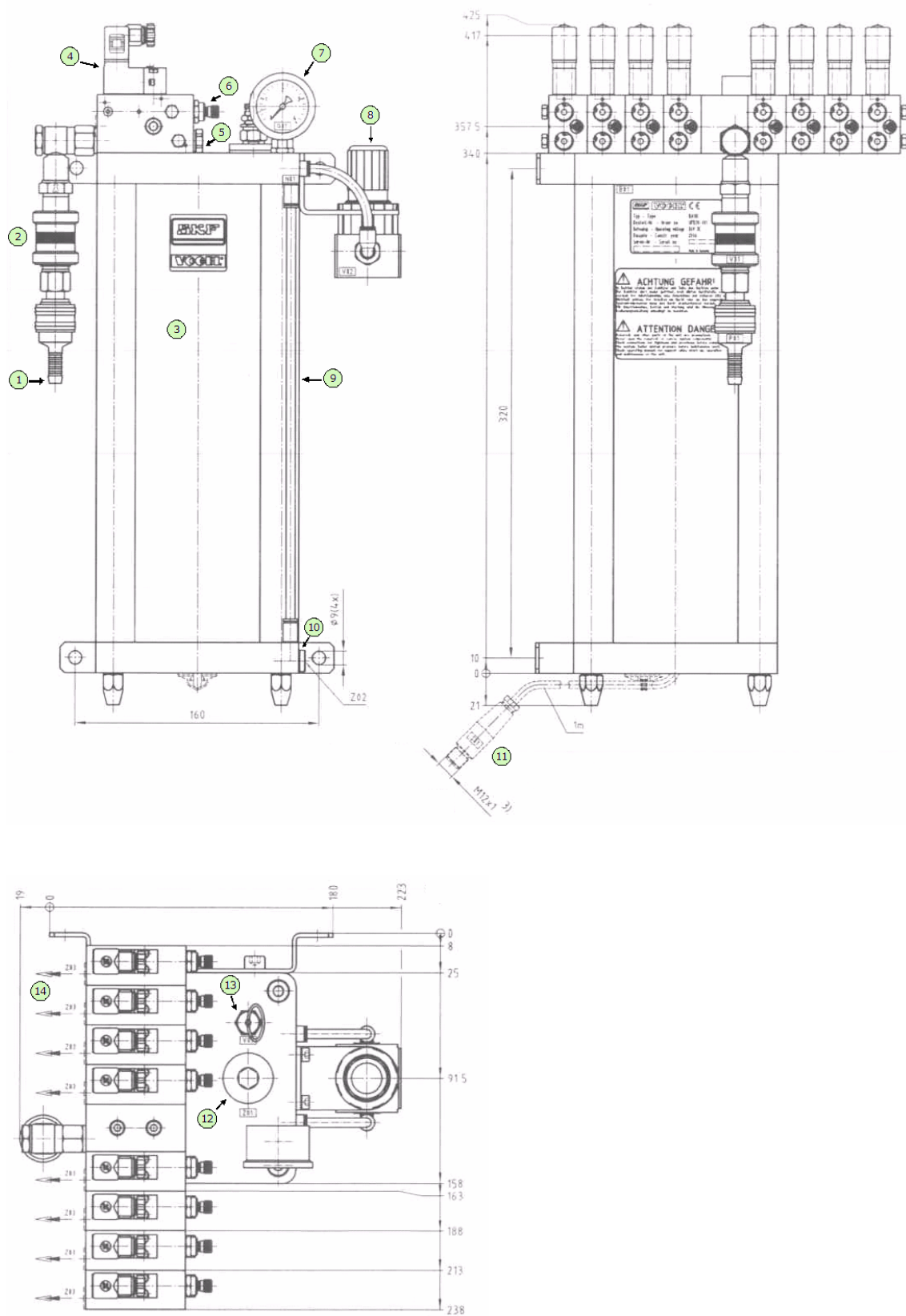
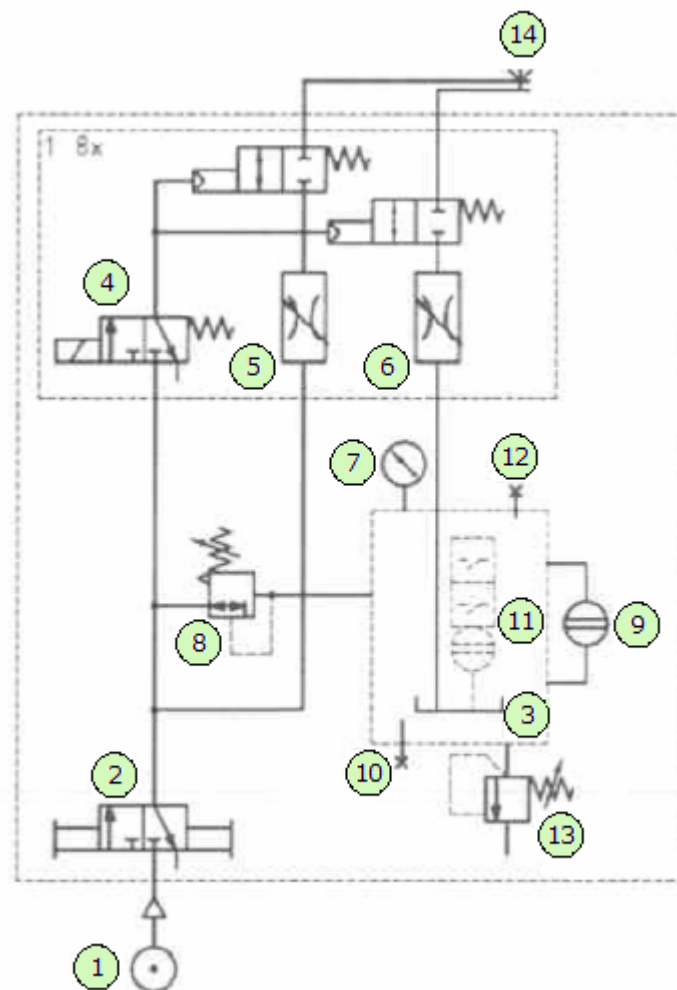


Figura 5.5: Planos del dispositivo Lubrilean Basic

- 1- Toma de aire comprimido
- 2- Válvula principal de entrada de aire
- 3- Depósito de aceite
- 4- Electroválvula
- 5- Válvula de regulación del caudal de aire
- 6- Válvula de regulación del caudal de aceite
- 7- Manómetro
- 8- Válvula reguladora de la presión del interior del depósito
- 9- Indicador del nivel de aceite del depósito
- 10-Tornillo para el drenaje de aceite
- 11-Sensor de nivel mínimo
- 12-Tapón de llenado de aceite
- 13-Válvula de seguridad
- 14-Tubos coaxiales para transportar aire y aceite



**Figura 5.6:** Esquema hidráulico del dispositivo Lubrilean Basic



### Datos técnicos:

- Peso en vacío: 6 kg
- Volumen del depósito: 3 litros
- Rango de temperatura admisible: +10 a +60°C
- Máxima presión de la red de aire comprimido: 6 bar
- Presión del depósito: 1 a 3 bar
- Número de salidas (boquillas de rociado): 2 a 8
- Flujo de aire: 25 a 50 NI/min (por toma)
- Flujo de aceite: 0 a 100 ml/h (por toma)
- Voltaje de funcionamiento de la electroválvula: 24 V DC
- Voltaje de funcionamiento del sensor de nivel mínimo: 24 V AC/DC
- Consumo de energía: 1,5 W

El modelo de aceite utilizado en el dispositivo Lubrilean Basic es Ultracut Bio 500 SP, un lubricante biodegradable, en base a ésteres sintéticos derivados de ácidos grasos vegetales, que contiene aditivos de media y extrema presión. No contiene compuestos clorados ni metales pesados. Este aceite está especialmente desarrollado para ser aplicado en procesos de corte por medio de equipos de pulverización, siendo recomendado para operaciones de mecanizado como fresado, taladrado, roscado, etc. en aplicaciones MQL. Este lubricante muestra su mejor rendimiento con aleaciones de difícil maquinabilidad, especialmente en aceros de alta aleación, incluso inoxidables. A continuación se muestra una tabla con las principales características de dicho aceite:

Característica	Valores típicos	Método
Aspecto	Amarillo transparente	Visual
Densidad a 20 °C	0,92 g/ml	ASTM D 1298
Viscosidad a 40 °C	46 cSt	ASTM D 445
Punto de inflamación	>290°C	ASTM D 92
Corrosión al cobre (3h, 50°C)	1A	ASTM D 130
Capacidad antidesgaste (Test 4 Bolas:40 kg/1hora/70°C)	0,35 mm	ASTM D 2783
Carga de soldadura (Ensayo 4 Bolas)	250 kg	ASTM D 2783

**Tabla 5.1:** Propiedades del aceite Ultracut Bio 500 SP



### 5.6 CONCLUSIONES

La idea fundamental de este capítulo es explicar los diferentes sistemas de lubricación y refrigeración utilizados en la mayoría de los procesos de fabricación por arranque de viruta.

En primer lugar se hace referencia a los fluidos de corte que se utilizan en la industria del mecanizado, siendo principalmente dos: los aceites de corte y las taladrinas. Posteriormente se enumeran cuáles son sus funciones y problemas principales. Entre estos problemas destacan los elevados costes de adquisición, mantenimiento y eliminación, la contaminación del medio ambiente y el riesgo para la salud de los operarios.

A continuación, se plantean dos posibles alternativas a la utilización de los fluidos de corte convencionales: el mecanizado en seco y el sistema MQL. El primero de ellos supone la total eliminación de los fluidos de corte, mientras que el segundo consiste en lubricar la zona de contacto pieza-herramienta con una mínima cantidad de lubricante.

El capítulo se centra en el sistema MQL, enumerando las principales ventajas que presenta frente a la lubricación convencional, entre las que se encuentran: reducción de costes, mayor eficiencia tecnológica y respeto por el medio ambiente.

Estas ventajas derivan principalmente de tres características claves del sistema MQL:

- En primer lugar, como consecuencia de una drástica disminución del consumo de lubricante, se produce una reducción de costes.
- En segundo lugar, debido al pequeño tamaño de las partículas de aceite que forman el aerosol, éstas pueden acceder a lugares en los que los fluidos de corte convencionales son incapaces de trabajar, mejorando la lubricación. De esta manera, el sistema MQL permite mecanizar con parámetros de corte más elevados, pudiendo conseguir en determinados procesos una mayor productividad y un aumento de vida de herramienta.



- En tercer lugar, al reducir el consumo, también se reducen las pérdidas de aceite por arrastre, fugas o salpicaduras. Además el aceite utilizado es biodegradable.

Finalmente se comentan las principales características del sistema Lubrilean Basic de Vogel, por ser este modelo el elegido para su instalación en la talladora Liebherr LC-502, cuyos pasos a seguir para alcanzar su correcto funcionamiento se detallarán más extensamente a lo largo del Capítulo 7.



## *CAPÍTULO 6:*

### *TALLADORA LIEBHERR LC-502*



## 6. TALLADORA LIEBHERR LC-502

### 6.1 INTRODUCCIÓN

La talladora de ejes Liebherr LC-502 está ubicada en la célula 82, perteneciente a la Minifábrica de Ejes y Engranajes, tal y como se explicó en el Capítulo 3. Es en ésta máquina-herramienta donde se lleva a cabo la instalación del sistema MQL externo, con el objetivo inicial de reducir el elevado consumo de aceite de corte.

En esta talladora se mecanizan dentados y estriados de ejes mediante el procedimiento de tallado por generación. Para ello, se utilizan diferentes fresas madre de acero rápido en función del eje a mecanizar.

En los siguientes apartados, se explican cuales son las características técnicas de esta talladora, así como cuál es el sistema de lubricación y refrigeración original de la máquina.



**Figura 6.1:** Imagen de la talladora Liebherr LC-502





## 6.2 DATOS TÉCNICOS DE LA TALLADORA LIEBHERR LC-502

Las especificaciones técnicas de esta talladora son las siguientes:

### Datos técnicos de la máquina:

Modelo de máquina: LC-502

Módulo máximo fresable: 10 mm

Cantidad mínima de dientes fresable: 8

Ángulo de giro del cabezal portafresas:  $\pm 50^\circ$

Carga de la mesa portapiezas: 50.000 kg

Peso de la máquina: 8.500 kg

### Datos técnicos del cabezal:

Revoluciones de la fresa ajustables sin escalonamiento: 48 – 480 rev/min

### Velocidades de los ejes x, v, z:

Avance axial (eje z): 0,01... 20 mm/rev

Marcha rápida (eje z): 2000 mm/min

Avance radial (eje x): 0,01... 4 mm/rev

Marcha rápida (eje x): 3000 mm/min

Avance (eje v): 0,01... 5 mm/rev

Marcha rápida (eje v): 1000 mm/min

### Datos técnicos parte eléctrica:

Tipo de corriente: 3 ~

Frecuencia: 50 Hz

Tensión de red: 400 V

Tensión de mando: 24 V

Corriente nominal: 92 A

Seccionador Principal: 125 A

Potencia instalada: 65 Kw

### Lista de valores límite:

Ángulo de presión:  $10^\circ$ ...  $30^\circ$

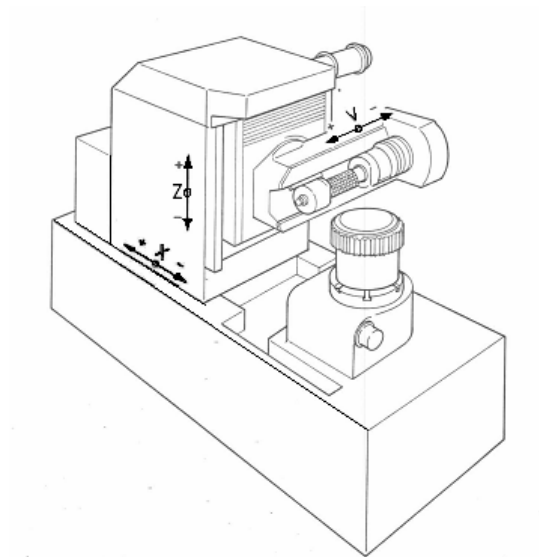
Altura de sujeción: 0... 775 mm

Diámetro exterior de la fresa: 0... 192 mm

Diámetro exterior de la pieza: 0... 500 mm



Conicidad del dentado: -0.2... 0.2 mm  
Avance axial: 0... 20 mm/rev  
Avance radial: 0... 4 mm/rev  
Vueltas de la mesa en marcha sin avance: 0... 5 rev  
Anchura del dentado: 0... 600 mm  
Profundidad del primer corte: 0... 25 mm  
Profundidad del segundo corte: 0... 25 mm  
Paso de la fresa: 0... 240 mm  
Longitud útil de la fresa (shifting, eje v): 0... 200 mm  
Velocidad de corte: 0... 200 m/min  
Número de entradas de la fresa madre: 1... 7  
Número de dientes de la pieza: 2... 500



**Figura 6.2:** Esquema de la talladora y sus ejes



### 6.3 SISTEMA DE LUBRICACIÓN Y REFRIGERACIÓN EN LA TALLADORA LIEBHERR LC-502

En el transcurso de este apartado se analizará el sistema de lubricación y refrigeración original de la talladora Liebherr LC-502.

Este sistema consiste en un flujo de aceite de corte que se aplica sobre la zona de contacto entre la fresa madre y la pieza que se está tallando. Para ello la talladora cuenta con un depósito de 300 litros de capacidad en su parte inferior.

El aceite de corte utilizado se elige a partir de una lista de posibles aceites que facilita el fabricante de la máquina, en este caso Liebherr. En concreto se utiliza el aceite de corte Cut-Max BR212, que es un aceite de corte puro para mecanizado severo de metales. Es una combinación de aceite mineral parafínico con aditivos antioxidantes, anticorrosivos, antiniebla y lubricantes especiales de extrema presión, que evitan la soldadura del metal sobre la herramienta de corte y prolongan su vida útil.

Las características físico-químicas de este aceite son las siguientes:

Característica	Valores típicos	Método
Aspecto	Líquido límpido	HI 101
Color	Ámbar	HI 102
Densidad a 15,5°C	0,93 g/cm <sup>3</sup>	ASTM D 1298
Viscosidad a 40°C	24 cSt	ASTM D 445
Punto de inflamación	185°C	HI 301
Corrosión acero	Negativa	ASTM D 130/88
Corrosión cobre	4a	ASTM D 130/88
Test Reichert 1,5 kg	<4,5 mm <sup>2</sup>	HI 830

**Tabla 6.1:** Propiedades del aceite Cut-Max BR212

El caudal de aceite necesario en el proceso de tallado, depende de las características del engranaje a mecanizar. En la documentación de la talladora se describen los pasos a seguir para conocer cual es el caudal de aceite de corte necesario en función del número de revoluciones de la fresa, del avance y del módulo. A continuación se muestra un resumen de dicha documentación:



- El primer paso es determinar el valor de corte  $k_s$  a partir del diagrama nº 1 (Figura 6.3), conociendo el número de revoluciones de la fresa madre  $n_0$  y la magnitud del avance  $s_x$ .

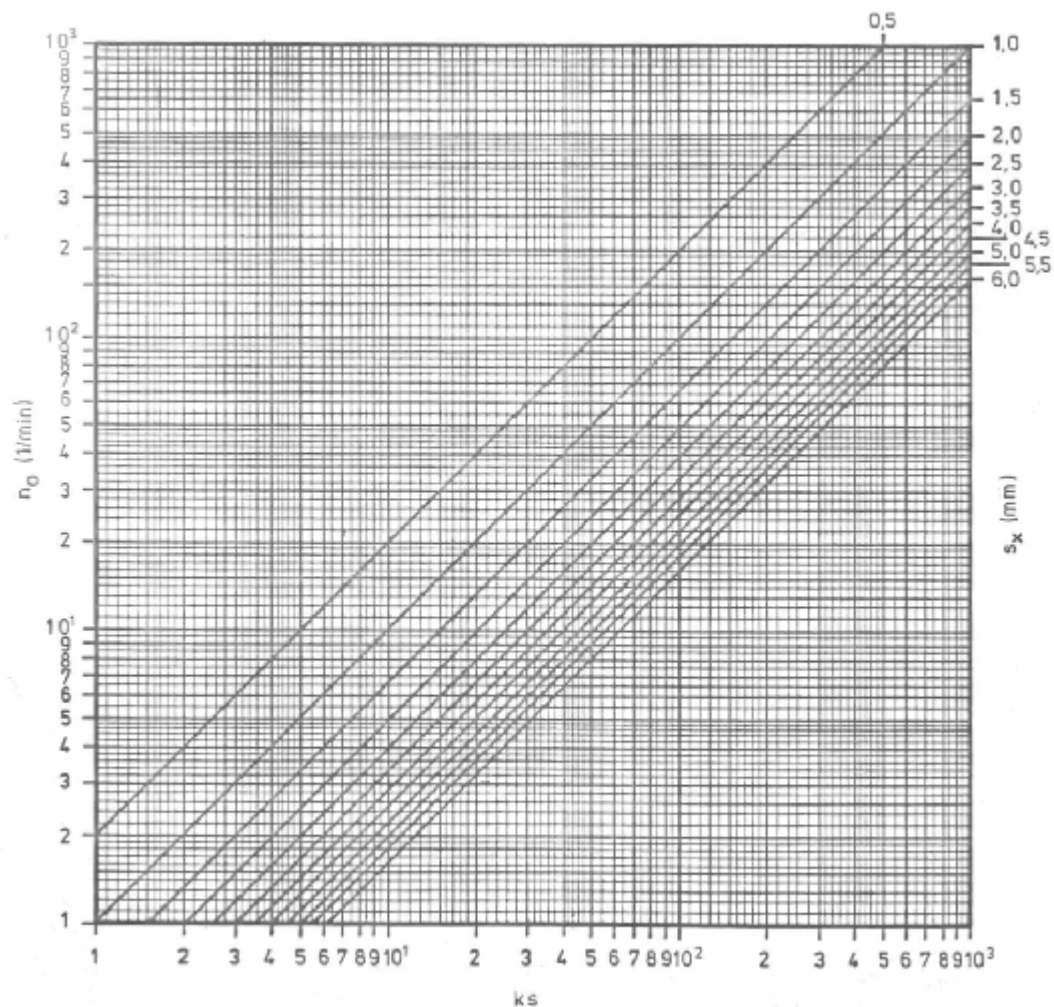


Figura 6.3: Diagrama de consumo de aceite de corte nº 1

- A partir del valor de corte  $k_s$  obtenido y conociendo el módulo del engranaje a mecanizar  $m_n$ , se puede obtener el caudal necesario de aceite de corte utilizando el diagrama nº 2 (Figura 6.4).

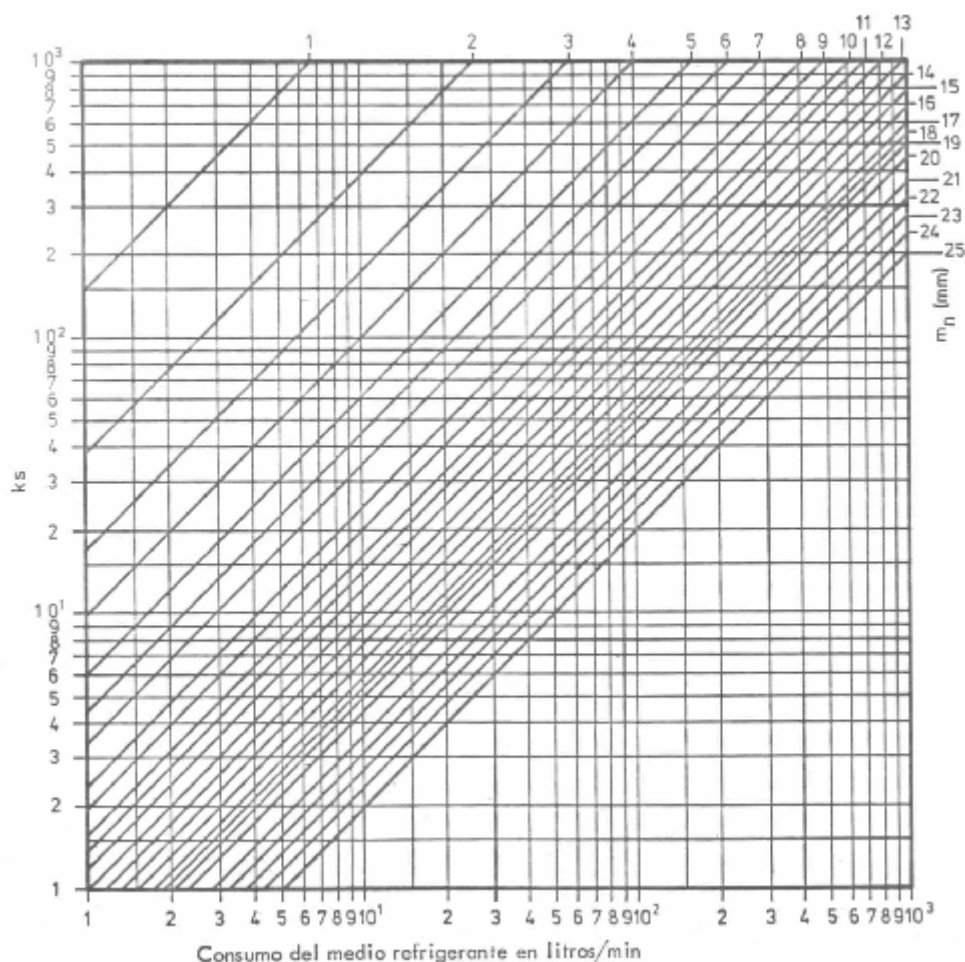


Figura 6.4: Diagrama de consumo de aceite de corte nº 2

Por ejemplo en el caso de la pieza CE 20126, que se utilizará para realizar las pruebas con el sistema MQL tal y como se explica en el siguiente capítulo, se mecaniza un dentado y un estriado. En el dentado, la velocidad de giro de la fresa madre es de  $n_0 = 336$  rpm, y el avance es  $s_x = 2,1$  mm/min, obteniendo a partir del diagrama nº 1 (Figura 6.3) un valor de corte  $k_s = 500$ . Con este valor y teniendo en cuenta que el módulo del engranaje a tallar es  $m_n = 2,5$  mm, en el diagrama nº 2 (Figura 6.4) se obtiene un caudal de aceite (consumo del medio refrigerante) de 20 litros/min.

De la misma forma, para el dentado de la pieza CE 18223 cuya velocidad de giro, avance y módulo son respectivamente  $n_0 = 340$  rpm,  $s_x = 2,4$  mm/min y  $m_n = 5,08$  mm, se obtiene un caudal de 100 litros/min.

Estos caudales deben ajustarse abriendo o cerrando una válvula de forma manual. Por ello y debido también a la variedad de piezas que se mecanizan en esta talladora, resulta difícil trabajar siempre con el caudal de aceite óptimo. En consecuencia se fija un caudal de unos 100 litros/min, por ser el recomendado para la pieza con mayor módulo y avance de cuantas se mecanizan en la talladora.

Este caudal, tras ser aplicado sobre la fresa madre y el eje a mecanizar, se recircula al depósito del aceite de corte, de forma que se reutiliza numerosas veces antes de que se considere agotado.



**Figura 6.5:** Imagen de la talladora trabajando con aceite de corte

En esta talladora existen problemas de contaminación del aceite de corte, ya que presenta fugas de aceite hidráulico que van a parar al depósito del aceite de corte, provocando una disminución de los aditivos y por tanto de sus propiedades, disminuyendo su poder refrigerante y generando nieblas.

Además, este sistema de lubricación conlleva grandes pérdidas de aceite por salpicaduras, arrastres en piezas y virutas, así como por la emisión de nieblas. Tal y como se mencionó en el capítulo anterior, estas pérdidas no sólo se consideran un problema económico, sino que provocan un serio problema medioambiental.





Debido a estas pérdidas de aceite de corte, es necesario verificar el nivel del depósito cada cierto tiempo, para rellenarlo cuando sea necesario. Además cada 2000 horas de trabajo se recomienda renovar los 300 litros del depósito, así como limpiar su interior para eliminar todos los contaminantes.

Por todas estas razones, este sistema de lubricación es muy eficaz, pero totalmente ineficiente: alcanza el objetivo pero derrocha recursos. Por ello, se decidió instalar el sistema de lubricación por cantidades mínimas en esta talladora.



## 6.4 CONCLUSIONES

El objetivo de este capítulo es dar a conocer cuales son las principales características de la talladora Liebherr LC-502, en la cual se instalará el sistema MQL para sustituir el actual sistema de lubricación y refrigeración.

En primer lugar se detallan cuales son las características técnicas de la máquina, desde datos técnicos de la parte mecánica como el rango de velocidades de giro y avance, hasta datos técnicos de la parte eléctrica.

A continuación se explica en profundidad cual es el sistema de lubricación y refrigeración utilizado en el proceso de tallado por generación que realiza esta máquina-herramienta.

Este sistema de lubricación consiste básicamente en un flujo de aceite de corte que se hace incidir sobre la zona de contacto entre la pieza a tallar y la fresa madre. El caudal de este aceite de corte ronda los 100 l/min, por lo que se trata de un sistema que resulta eficaz, pero es totalmente ineficiente.





## *CAPÍTULO 7:*

# *IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA MQL EN LA TALLADORA LIEBHERR LC-502*



## **7. IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA MQL EN LA TALLADORA LIEBHERR LC-502**

### **7.1 INTRODUCCIÓN**

Este proyecto tiene como objetivo optimizar el proceso de tallado por generación utilizando un sistema MQL, concretamente el sistema Lubrilean Basic de Vogel, cuyas características y especificaciones técnicas se explicaron en el Capítulo 5, relativo a la lubricación y refrigeración en el mecanizado.

En el capítulo presente, se describen los pasos a seguir para lograr la instalación y el correcto funcionamiento de este dispositivo de lubricación por cantidades mínimas en la talladora Liebherr LC-502.

Resulta importante destacar que este proyecto es totalmente innovador, dado que ni existen talladoras diseñadas para trabajar con MQL, ni se conoce ninguna aplicación de sistemas MQL en el proceso de tallado por generación.

Por este motivo, fue necesario comprobar la eficacia de este sistema de lubricación por cantidades mínimas en dicho proceso. Para ello se realizaron numerosas pruebas, comparando los resultados obtenidos en las piezas y en los desgastes de las fresas, al trabajar con aceite de corte y con MQL.

### **7.2 INSTALACIÓN DEL FILTRO EXTRACTOR**

Previo a la instalación del sistema MQL, se decidió instalar un sistema de filtración y aspiración de niebla de aceite en la talladora Liebherr LC-502. El motivo principal por el que se tomó esta decisión, fue la incapacidad del anterior filtro para eliminar la neblina de aceite generada durante el ciclo de tallado.

Cuando la talladora mecanizaba una pieza con aceite de corte, se generaba una densa niebla que al abrir las puertas era emitida al interior de la fábrica. Por ello, antes de instalar el sistema MQL, se decidió instalar el filtro como medida preventiva, evitando que al trabajar con MQL se causaran problemas de contaminación similares.



Concretamente, el filtro instalado es de la marca Donaldson, modelo DMC-MMC, constituido por un sistema de filtración en tres etapas. La primera está formada por un filtro metálico, la segunda por un envoltorio multicapa (tres materiales filtrantes) y la tercera por un cartucho filtrante de alta eficiencia. En el Anexo B se pueden observar las principales características de este filtro.

Para llevar a cabo su instalación, en primer lugar se seleccionó una ubicación junto a la talladora, de forma que no dificultara el trabajo de los operarios de la célula. Una vez seleccionado dicho emplazamiento, se trabajó junto a operarios del Departamento de Mantenimiento para llevar a cabo la instalación de un soporte de 2,5 metros de altura, sobre el que se situó el filtro. El soporte se ancló al suelo mediante 16 tornillos y el filtro se fijó a su vez al soporte utilizando 4 tornillos.



**Figura 7.1:** Instalación del soporte del filtro



**Figura 7.2:** Instalación del filtro sobre el soporte

A continuación se instaló un tubo flexible para conectar la parte superior de la talladora con el filtro, con el objetivo de conseguir una correcta aspiración de la neblina de aceite generada durante el proceso de tallado.

Una vez concluida su instalación física, se procedió a realizar las conexiones entre el filtro y el cuadro eléctrico de la talladora, para lo cual se trabajó junto a un técnico en electricidad. También fue necesario programar el PLC de la talladora

para que el filtro entrase en funcionamiento al iniciar ciclo, y dejase de funcionar tres minutos después de terminar ciclo.

En el Anexo A se puede observar cual es la secuencia seguida en el programa Simatic para que el filtro funcione de forma automática. Concretamente se añadieron los segmentos 12 y 13 del módulo FC113.

Finalmente, con el objetivo de proteger el soporte del filtro de posibles golpes producidos por carretillas o grúas al circular por los pasillos, se trabajó junto a Ingeniería de Planta para instalar unas protecciones de seguridad.



**Figura 7.3:** Conexiones entre filtro y talladora



**Figura 7.4:** Vallas de protección para el filtro

Una vez concluida la instalación del filtro y tras haber programado el PLC de la talladora, se comenzó a probar su eficacia mecanizando con aceite de corte.

De esta manera, se observó que la neblina de aceite generada en el interior de la talladora era aspirada sin problemas, obteniendo aire limpio en la salida del filtro. El aceite retenido era recirculado a través de un drenaje hacia el extractor de viruta.

Dado que este filtro contribuía a mejorar las condiciones de trabajo de los operarios de la célula 82, éstos se mostraron satisfechos con dicha instalación.



## 7.3 INSTALACIÓN DEL SISTEMA MQL

Para instalar el sistema Lubrilean Basic en la talladora Liebherr LC-502, fue necesario superar algunas dificultades relacionadas con el diseño de la propia máquina.

Por un lado se llevó a cabo la instalación de las boquillas, el depósito y las conexiones entre ambos. Por otro lado se tuvieron que realizar las correspondientes conexiones eléctricas, así como la programación del PLC de la talladora, para lograr que el MQL funcionase de forma automática.

### 7.3.1. PRIMERA FASE: POSICIONAMIENTO Y MONTAJE DE LAS BOQUILLAS

El primer paso consistió en buscar un lugar adecuado para instalar las cuatro boquillas emisoras de la mezcla aire-aceite. Este paso es de vital importancia, ya que las boquillas deben estar, en todo momento, orientadas hacia las aristas de corte de la fresa madre que estén en contacto con la pieza de trabajo. Además, estas boquillas deben estar situadas en un lugar que no impida ni dificulte los movimientos del carro portafresas.

La única ubicación posible resultó ser un soporte situado en dicho carro portafresas (Ver Figura 7.7). Este soporte hace de guía para que las fresas realicen el shifting (movimiento en el eje V de la talladora), pero sin llegar a recorrer toda su longitud, dejando espacio suficiente para colocar las cuatro boquillas.

Para fijar las boquillas de forma rígida sobre el soporte de la máquina, se fabricó una pieza exclusivamente con este fin en el Departamento de Mantenimiento. Además se seleccionó una rótula para cada boquilla, de manera que fuese posible orientar cada una de ellas en la dirección deseada.



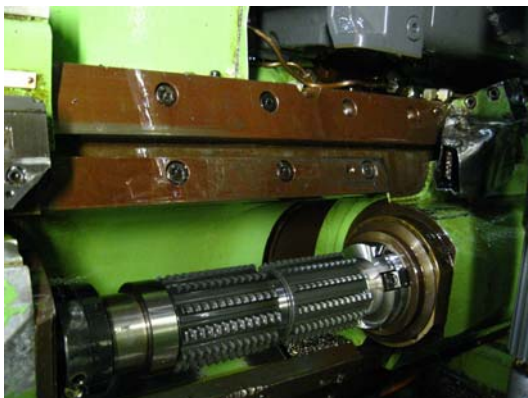


**Figura 7.5:** Boquillas, rótulas y pieza de sujeción antes de su montaje

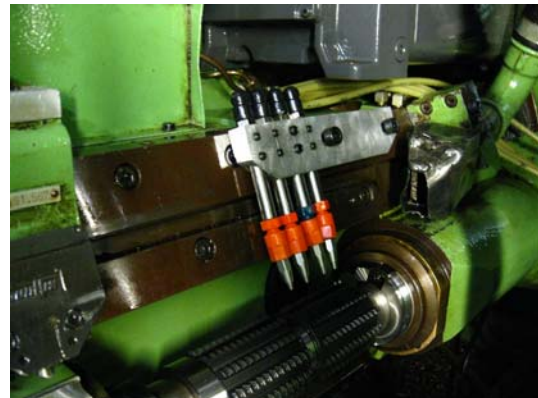


**Figura 7.6:** Boquillas conectadas a las rótulas y a la pieza de sujeción

Una vez seleccionada la ubicación y las piezas necesarias para instalar las boquillas se procedió a su montaje. Para ello, fue necesario trabajar junto a mecánicos del Departamento de Mantenimiento.



**Figura 7.7:** Guía sobre la que se decidió instalar las boquillas



**Figura 7.8:** Boquillas instaladas en el interior de la talladora

### 7.3.2 SEGUNDA FASE: POSICIONAMIENTO Y MONTAJE DEL DISPOSITIVO LUBRILEAN BASIC

Con las boquillas instaladas, el siguiente paso consistió en fijar el dispositivo Lubrilean Basic (depósito de aceite) en el bastidor de la talladora, por ser una zona protegida de golpes y vibraciones. Para su fijación fue necesario realizar dos taladros sobre el bastidor y utilizar dos tornillos.

Complementariamente se instalaron los cuatro tubos coaxiales encargados de transportar el aire y el aceite hasta las cuatro boquillas correspondientes. Para guiar estos tubos por el interior de la talladora se utilizaron bridas.



**Figura 7.9:** Dispositivo Lubrilean Basic instalado en el bastidor de la talladora

A continuación, se conectó este dispositivo a una toma de aire comprimido de 6 bares. De esta forma, activando la electroválvula de manera manual, fue posible tallar algunas piezas con MQL, comprobando que la instalación del sistema era correcta.

### **7.3.3 TERCERA FASE: AUTOMATIZACIÓN Y PROGRAMACIÓN DEL MQL**

Para que este dispositivo trabajase de forma automática, fue necesario realizar las correspondientes conexiones con el cuadro eléctrico de la talladora. Concretamente fue preciso conectar la electroválvula y el sensor de nivel mínimo.

Para conectar estas señales a las entradas y salidas correspondientes del cuadro eléctrico, fue necesario trabajar junto a técnicos en electricidad. También fue necesario programar el PLC de la máquina, para conseguir que el MQL entrase en funcionamiento en el momento deseado.

En primer lugar se instaló un selector de dos posiciones en el control numérico de la talladora, de forma que mientras se realizasen las pruebas con el sistema



Lubrilean Basic, se pudiera seleccionar entre tallar con MQL o con aceite de corte únicamente moviendo el selector hacia uno u otro lado.

Gracias a este selector, fue posible realizar las pruebas que se describen en el siguiente apartado, para poder comparar los desgastes de las fresas madre con estos dos sistemas de lubricación.



**Figura 7.10:** Selector instalado en el panel de control numérico de la talladora para trabajar con aceite de corte o con MQL

Una vez seleccionado aceite de corte o MQL, tan solo era necesario pulsar el botón de inicio de ciclo para que la talladora comenzase a trabajar con un sistema de lubricación o con el otro.

La secuencia de programación seguida para que la talladora pueda trabajar con MQL o con aceite de corte se muestra en el segmento 5 del bloque FC113 recogido en el Anexo A.

La programación del PLC se realizó de forma que al trabajar con MQL, se permitiera realizar un “enjuague de la pieza” cuando la puerta de la talladora se encontraba abierta. El objetivo buscado era poder comprobar que las boquillas estaban orientadas hacia el punto de contacto entre fresa y pieza.

La alarma correspondiente al sensor de nivel mínimo de aceite, fue programada en el segmento 48 del bloque FC139, donde se encuentran todas las alarmas de la talladora. Esta alarma se programó de manera que cuando el sensor de nivel mínimo tomaba el valor cero, se permitía terminar el ciclo de tallado, pero se





impedía iniciar el siguiente ciclo si el depósito de aceite no era rellenado, es decir, si el sensor de nivel mínimo no tomaba el valor uno.

Una vez finalizada la programación del PLC se comenzó a tallar con el sistema MQL de forma automática. Sin embargo, tras mecanizar un elevado número de piezas se comprobó que al prescindir del aceite de corte, se producía una acumulación de viruta dado que ésta no era evacuada correctamente hacia el extractor de viruta.



**Figura 7.11:** Acumulación de viruta en la talladora al utilizar MQL

Debido a que el diseño de la máquina exigía utilizar aceite de corte para conseguir una correcta evacuación de la viruta, fue necesario modificar la programación del PLC. Concretamente se añadió el segmento 14 al bloque FC 113, en el cual se programó que al retroceder el carro portafresas hacia atrás (eje x de la talladora), se activase la bomba de aceite de corte durante 5 segundos.

Con esta última modificación la viruta era evacuada sin problemas, pudiendo utilizar el sistema MQL sin causar daños a la talladora. Aunque de esta manera no se consiguió eliminar el aceite de corte, éste era utilizado únicamente para facilitar la evacuación de la viruta, reduciendo de forma significativa su consumo.

Con estas tres fases completadas, fue posible llevar a cabo las pruebas que a continuación se detallan.



## 7.4 PRUEBAS A REALIZAR PARA LA IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA MQL

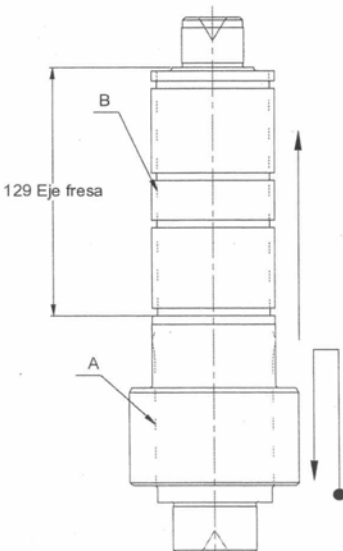
Una vez instalado el sistema Lubrilean Basic en la talladora Liebherr LC-502, se realizaron numerosas pruebas para comprobar la eficacia de este nuevo sistema de lubricación.

Con este fin, se talló gran cantidad de piezas con MQL y con aceite de corte, comparando las temperaturas alcanzadas, los gráficos de tallado y sobre todo los desgastes producidos en las fresas madre. A continuación se detallan cuales fueron los pasos a seguir para realizar dichas pruebas.

### 7.4.1 PIEZAS SELECCIONADAS

De los ocho tipos de ejes mecanizados en la célula 82, se seleccionaron dos para realizar pruebas con MQL, concretamente los siguientes: CE 18223 y CE 20126. En las figuras 7.12 y 7.13 se muestran sus hojas de datos mecánicos correspondientes al tallado realizado en la máquina Liebherr LC-502.

Fecha original	29/11/1998	Por	P. Cubero	Célula N°	82	Dpto. N°	921	Pieza N°	CE-18223
Fecha de rev.	28/04/2009	Por	A. Manzanares	Dec./Nivel Dis.	B	Máquina N°	1014	Oper. N°	10
Revisión	PUNT. COND. Y TM			Material	JDM 8620	Código Maq.	Y-35-44	Programa N°	
Máquina	Talladora vertical LIEBHERR	Nombre Pieza	Eje de diferencial		Producto	diferencial tres velocidades		Subprog. N°	
Programa Pieza	CE18223								
TALLADO "A"	T223 (N35-10-15381)								
TALLADO "B"	T162 (N35-10-15305)								



129 Eje fresa

A

B

Descripción de la operación	Posición Hta.	Vida Pzas.	Htas. o Calibres Número	Htas. o Calibres Descripción	Cant.
Tallar dentado helicoidal ( A )	I		F-35-10-15204	Dispositivo de tallar	1
			F-35-10-15458	Suplemento	1
			N-35-30-15702	Eje portafresas Ø 32	1
	T223	350	N-35-10-15381	Fresa madre (Dentado A)	1
			F-49-35-00021/023	Micro de platillos 25 + 50	1
TALLAR ACANALADO	II				
(B)	T162	350	N-35-10-15305	Fresa madre	1
		1/10	F-49-18-15403	Cal. anch.dent.15.151+15.050	
					1
		1/10	F-49-50-15189	Calibre fondo dentado	1
		1/10	F-49-50-15190	Calibre relacion dentado	1
			F-49-29-15078/2	Calib. comprob. alineacion	1
				* VER DETALLE ALINEACIÓN DIENTES PAG SIGUIENTE	1

DENTADO (A)	Medida cordal sobre ( 3 ) dientes	Max.= 39,17 Min.= 39,13	Posic. Hta.	Veloc. r.p.m.	Avan. mm/mim.	Dist. mm.	Descripción del elemento	Tiempo min.
DATOS PIEZA		DATOS FRESA						
Nº dientes	13	Nº de entradas	1	I	290	2,0	Tallar desb.	
Módulo	5,0800	Sentido hélice	DERECHA					
Ang. Hélice	18,30°	Angulo hélice	3,3753°	I	290	5	Tallar acab	
Sent. Hélice	Izquierdas	Diámetro ext.	100					
Altura diente	12,46	Longitud útil	90	I I	340	2,4	Tallar	
Paso hélice		Nº de ranuras	12					
DENTADO (B)	Medida cordal sobre ( ) dientes	Max.= Min.=						
DATOS PIEZA		DATOS FRESA		Movimientos rápidos posicionados, carga y descarga de piezas				
Nº dientes	9	Nº de entradas	1					
Módulo	-	Sentido hélice	Derecha					
Ang. hélice	-	Angulo hélice	5.4166°					
Sent. Hélice	-	Diámetro ext.	76					
Altura diente	2,45	Longitud útil	75					
Paso hélice		Nº de ranuras						
TIEMPO TOTAL MAQUINA POR UNA PIEZA								6,45

Figura 7.12: Hoja de datos mecánicos de la pieza CE 18223



Fecha original	15-12-05	Por	A. Gonzalez	Célula N°	82	Dpto. N°	921	Pieza N°	CE-20126
Fecha de rev.	23-09-09	Por	A. Manzanares	Dec./Nivel Dis.	"A"	Máquina N°	1014	Oper. N°	20
Revisión	PUNT. COND. Y TM. (atendida decisión 20845)			Material	JDM 8822	Código Maq.	Y-35-44	Programa N°	W CE20126
Máquina	Talladora vertical CNC Liebherr	Nombre Pieza		Eje de diferencial		Producto	Caja dos velocidades	Subprog. N°	
Programa Principal	W_CE20126								

(A)

(B)

Descripción de la operación		Posición Hta.	Vida Pzas.	Htas. o Calibres Número	Htas. o Calibres Descripción	Cant.	
				F-35-10-15204	Base universal (sólo base)	1	MAQ
		C CE20126		F-35-10-15267	Dispositivo de tallar	1	MAQ
				F-35-30-15702	Eje portafresas Ø 32	1	
				F-35-14-15	Contrapunto	1	
					Luneta	1	
					Suplemento empujador para útil F35-10-15267	1	
Tallar dentado helicoidal ( A )				N-35-10-15444	Fresa madre (Dentado A)	1	
Z = 21 , inclinación derechas		1/10		F-49-35-00021/023	Micro de platillos 25 + 50	1	
Tallar estriado ( B )				N-35-11-15333	Fresa madre (Dentado B)	1	
Z = 23		1/10		F-49-49-150024/004	Varillas Ø 3,048	2	
				F-49-35-0001/14	Micro exteriores	1	
		1/10		F-49-50-15330	Calibre relacion de dentado	1	

DENTADO (A)		Medida cordal sobre ( 4 ) dientes	Max.= 26,92 Min.= 26,88	Posic. Hta.	Veloc. r.p.m.	Avan. mm/min.	Dist. mm.	Descripción del elemento	Tiempo min.
DATOS PIEZA		DATOS FRESA		V.C.C.					
Nº dientes	21	Nº de entradas	1	I	90/95	1,8/2,1		Tallar ( A )	2,25
Módulo	2,5000	Sentido hélice	DCHAS		318/336				
Ang. Hélice	20	Angulo hélice	1°43'14"						
Sent. Hélice	Derechas	Diámetro ext.	90						
Altura diente	5,80	Longitud útil	90	II	95/95	2,1		Tallar est. ( B )	1,25
Paso hélice		Nº de ranuras	15		432				
DENTADO (B)		Medida s/ varillas de Ø 3,048	Max.= 40,99 Min.= 40,95						
DATOS PIEZA		DATOS FRESA		Movimientos rápidos posicionados, carga y descarga de piezas					
Nº dientes	23	Nº de entradas	1						1,90
Módulo	1,5875	Sentido hélice	DCHAS						
Ang. hélice	0	Angulo hélice	1° 20'	NOTA : La medida cordal , pendiente de puntualizar con el lote piloto.					
Sent. Hélice	RECTO	Diámetro ext.	70						
Altura diente	1,935	Longitud útil							
Paso hélice		Nº de ranuras							
TIEMPO TOTAL MAQUINA POR UNA PIEZA									5,40

Figura 7.13: Hoja de datos mecánicos de la pieza CE 20126

En las hojas de datos mecánicos de ambas piezas, se pueden observar todos los datos relativos a los tallados realizados, con sus correspondientes fresas madre, velocidades de corte, avances, etc. Cabe destacar que en las dos piezas se realiza un dentado A y un dentado B, siendo el primero un dentado helicoidal, mientras que el segundo es un estriado. Por esta razón, en cada tipo de pieza se utilizan dos fresas madre diferentes, una para tallar el dentado, y otra para el estriado.

El principal motivo por el cual se seleccionaron estas dos piezas, fue que eran las que presentaban una mayor producción durante los meses en los que se realizaron las pruebas. Pero también se tuvo en cuenta el hecho de que los dentados tuviesen módulos muy diferentes.

La pieza CE 18223 era la que presentaba un dentado con mayor módulo, mientras que la pieza CE 20126 era la que tenía menor módulo de los ocho tipos de piezas mecanizadas en la célula 82. Además, el dentado de ambas piezas es helicoidal, que suele presentar mayores complicaciones para ser tallado que el dentado recto.



**Figura 7.14:** Eje CE 18223 a la entrada y a la salida de la talladora Liebherr LC-502



**Figura 7.15:** Eje CE 20126 a la entrada y a la salida de la talladora Liebherr LC-502

De esta manera, si el sistema MQL funcionaba de manera correcta con estas dos piezas, también funcionaría con los otros seis tipos de piezas que eran mecanizados en la talladora Liebherr LC-502. Este era uno de los requisitos que imponía el Departamento de Producción, para que el sistema MQL fuese implantado de manera definitiva en la talladora.

#### **7.4.2 FRESAS MADRE UTILIZADAS**

Como se comentó en el apartado anterior, en cada una de las piezas seleccionadas se talla un dentado y un estriado, siendo necesario utilizar dos fresas diferentes para cada pieza.

En John Deere Ibérica S.A. cada herramienta está identificada por un código. Las fresas madre utilizadas en la pieza CE 18223 tienen las siguientes referencias: N-35-10-15381 para el dentado y N-35-10-15305 para el estriado. Estas dos fresas se muestran en las figuras 7.16 y 7.17.





**Figura 7.16:** Fresa N-35-10-15381



**Figura 7.17:** Fresa N-35-10-15305

Las fresas utilizadas en la pieza CE 20126 tienen las siguientes referencias: N-35-10-15444 para el dentado y N-35-11-15333 para el estriado. Estas fresas se muestran en las figuras 7.18 y 7.19.



**Figura 7.18:** Fresa N-35-10-15444



**Figura 7.19:** Fresa N-35-11-15333

En las hojas de datos mecánicos presentadas en el anterior apartado, se encuentran recogidas las principales características mecánicas de cada una de estas cuatro fresas madre: número de entradas, ángulo y sentido de hélice, número de ranuras, diámetro, etc.

Estas cuatro fresas están fabricadas a base de acero rápido pulvimetalúrgico PM-30 y tienen un recubrimiento de carbonitruro de titanio (TiCN), lo que les proporciona elevada dureza en caliente y resistencia a la oxidación.



Recordemos que en el Capítulo 4 relativo al tallado de engranajes, se explicaron los principales mecanismos de desgaste en fresas madre, centrando la atención en fresas de acero rápido con recubrimiento, caso en el que nos encontramos.

Cuando una fresa madre ha tallado un número determinado de piezas, el recubrimiento de la superficie de incidencia se erosiona debido al desgaste tipo abrasivo, deteriorando el filo de corte de los dientes de dicha fresa. Cuando este desgaste alcanza un valor comprendido entre 0,2 y 0,3 milímetros, la fresa debe ser afilada.

En John Deere Ibérica, el afilado de las fresas madre se realiza en el Departamento de Herramientas, dentro de la propia factoría de Getafe. Tras ser afiladas, estas fresas se envían a empresas externas para que sean recubiertas de nuevo. De esta manera, una fresa madre de estas características, se afila y se envía a recubrir 10 veces antes de ser desechada.

Al trabajar con aceite de corte, las fresas N-35-10-15381 y N-35-10-15305, utilizadas para tallar el eje CE 18223, son enviadas a afilar tras completar tres veces el shifting. Teniendo en cuenta que cada 70 piezas se completa un shifting, entre dos afilados consecutivos se tallan 210 piezas.

En el caso de las fresas N-35-10-15444 y N-35-11-15333, utilizadas en el eje CE 20126, también son enviadas a afilar tras completar tres veces el shifting, aunque en este caso el shifting se completa cada 75 piezas. Por lo tanto entre dos afilados consecutivos se tallan 225 piezas.

### 7.4.3 PRUEBAS Y DESGASTES DE LAS FRESAS

Para saber si el sistema MQL funcionaba de forma correcta con esas cuatro fresas madre, fue necesario verificar las piezas que se mecanizaban en la talladora, ya que debían ser válidas para producción.

Por este motivo, a la salida de la talladora, los operarios utilizaban un micrómetro de platillos para verificar los dentados y un calibre pasa/no pasa para los estriados. Además, tras ser mecanizadas en la célula 82, una pieza por turno era enviada al laboratorio de control de engranajes, donde se sometía a un



procedimiento de rodadura con un patrón, utilizando una máquina Klingelnberg ZW-300. Ver figuras 7.20 y 7.21.



**Figura 7.20:** Micrómetro de platillos para medir el espesor cordal entre varios dientes



**Figura 7.21:** Máquina Klingelnberg para el control de engranajes por rodadura

También se tomaron registros de las temperaturas superficiales de las piezas y las fresas al finalizar el ciclo de tallado, utilizando para ello un termómetro de contacto. De esta manera se pudieron comparar las temperaturas alcanzadas al tallar con aceite de corte y con MQL. Ver Figura 7.22.



**Figura 7.22:** Medición de la temperatura superficial de la pieza CE 18223 con termómetro de contacto

Con el objetivo de comprobar si realmente este sistema de lubricación era eficaz, también se compararon los desgastes producidos en las diferentes fresas madre al utilizar aceite de corte y MQL. Éste fue el punto clave para saber si el sistema MQL era adecuado para la talladora, ya que si la vida de las fresas disminuía al utilizar este sistema de lubricación, aunque se redujeran los costes relacionados con el aceite de corte, no se obtendría rentabilidad económica.

El análisis de los desgastes producidos en las fresas, se realizaba cada vez que se completaba un shifting, es decir, cada 70 piezas talladas con las fresas N-35-10-15381 y N-35-10-15305, y cada 75 piezas con las fresas N-35-10-15444 y N-35-11-15333.

El hecho de que los registros fuesen tomados cada vez que se completaba un shifting, se debe a que en ese momento, el desgaste en todos los dientes de la fresa madre es homogéneo. De no ser así, unos dientes estarían más desgastados que otros.

Los desgastes se analizaron utilizando un microscopio con capacidad de 45 aumentos, aunque para obtener buenas imágenes se trabajó con un máximo de 20. Este microscopio se conectó mediante una cámara (Moticam 2000) a un ordenador,



de forma que fue posible tomar imágenes de los desgastes producidos en distintos dientes de cada fresa madre. Gracias al software Motic Images Plus 2.0 ML, se pudieron cuantificar los desgastes de las imágenes captadas por la cámara.



**Figura 7.23:** Microscopio utilizado (parte izquierda) en el análisis de los desgastes de las fresas madre con la cámara conectada en el visor izquierdo para transmitir las imágenes al ordenador (parte derecha)

Como se comentó en el anterior apartado, las cuatro fresas madre que se analizaron, habitualmente eran enviadas a afilar al completar 3 veces el shifting, ya que experimentalmente se conocía que al tallar 210 piezas con las fresas N-35-10-15381 y N-35-10-15305, y 225 piezas con las fresas N-35-10-15444 y N-35-11-15333, se obtenía un desgaste de unos 0,2 ó 0,3 milímetros.

Sin embargo, para poder obtener buenas conclusiones sobre la influencia que el sistema MQL tiene sobre los desgastes producidos en las fresas, durante estas pruebas se realizaron 4 o incluso 5 shiftings antes de que fuesen enviadas a afilar.

Por este motivo, preparadores e ingenieros de producción examinaban cada una de las fresas antes de realizar un nuevo shifting, con el fin asegurarse de que no existía riesgo de rotura de sus dientes.

Es importante destacar que todas las pruebas fueron realizadas con fresas que habían sido afiladas al menos una vez, es decir, no se trataba de fresas nuevas.



Respecto al caudal de aceite utilizado por el sistema MQL en estas pruebas, fue necesario realizar numerosos ensayos y pedir consejo a los proveedores de este dispositivo para obtener un funcionamiento óptimo del mismo. Finalmente se seleccionó un caudal de 100 ml/h para todas las pruebas.

En el siguiente capítulo se muestra un análisis de los resultados que se obtuvieron en estas pruebas.

## 7.5 IMPLANTACIÓN DEFINITIVA DEL SISTEMA MQL

En el caso de que se consiguiesen resultados positivos en todas las pruebas y finalmente se quisiese implantar el sistema MQL de manera definitiva en la talladora, se debería dar solución a algunos problemas que pueden surgir como resultado de trabajar de forma continua con este sistema de lubricación. Por este motivo, a continuación se describen dos posibles mejoras que podrían llevarse a cabo en la instalación del MQL.

La primera mejora consiste en realizar una instalación en la talladora para solucionar el problema de evacuación de la viruta.

Dicha instalación consistiría en una electroválvula de 3 vías colocada sobre la manguera que transporta el aceite de corte. En una de las salidas de la electroválvula debería conectarse de nuevo la manguera de aceite, mientras que en la otra salida se debería conectar un sistema de tuberías, el cual terminase con 4 toberas de proyección orientadas hacia las zonas donde se produce la acumulación de viruta.

De esta forma, cuando se quisiese trabajar con aceite de corte, la talladora funcionaría tal y como funciona ahora. En cambio cuando se seleccionase el sistema MQL, el aceite de corte sería dirigido hacia las zonas de la talladora donde se produce mayor acumulación de viruta, es decir, mientras que el MQL estuviese lubricando la zona de contacto entre herramienta y pieza, el aceite de corte se encargaría de evacuar la viruta de un modo eficaz.



Otro problema de implantar definitivamente el sistema MQL es que visualmente es muy difícil detectar cuando está funcionando, debido a que trabaja con un caudal de aceite que a simple vista es inapreciable.

Por este motivo, en caso de que el sistema MQL se implantase de forma definitiva, sería necesario instalar un elemento de seguridad que indicase si existe flujo de aceite, dado que en caso de avería de la electroválvula, o en caso de que se obstruyesen los conductos de aceite, la máquina podría tallar en seco provocando importantes daños a las fresas.

Una solución a este posible problema consistiría en instalar un caudalímetro o un presostato a la salida del depósito del MQL. La misión de este dispositivo sería indicar si el sistema MQL está funcionando correctamente, es decir, si existe flujo de aire y aceite a la salida del mismo.

Por último, en la siguiente tabla se muestra la pauta de automantenimiento que debería seguir el operario de la célula para que el sistema MQL funcionase de forma adecuada.



PAUTA A SEGUIR	IMAGEN REPRESENTATIVA	ACCIÓN A REALIZAR	FRECUENCIA
Comprobar nivel de aceite		Llenar depósito con aceite Ultracut Bio 500 SP	Diariamente
Comprobar presión del depósito		Asegurarse de que el manómetro indica entre 1 y 2 bares, de no ser así abrir o cerrar la válvula reguladora de presión del depósito	Diariamente
Comprobar orientación de las boquillas		Asegurarse de que las boquillas están orientadas hacia el punto de contacto entre la fresa madre y la pieza a tallar, de no ser así orientarlas manualmente	Diariamente

**Tabla 7.1:** Pauta de automantenimiento del sistema MQL

Con esta pauta de automantenimiento y las dos propuestas de mejora anteriormente citadas, el sistema MQL estaría en condiciones de trabajar de forma continua sin problemas de fiabilidad.



## 7.6 CONCLUSIONES

El objetivo principal de este capítulo es dar a conocer, cuales fueron los pasos seguidos para instalar y conseguir un funcionamiento correcto del sistema MQL Lubrilean Basic, en la talladora Liebherr LC-502.

En primer lugar se llevó a cabo la instalación de un filtro extractor de neblina de aceite, de forma que al trabajar con MQL no se produjeran problemas por la neblina generada, y además se contribuyese a conseguir una mejor atmósfera de trabajo en el interior de la fábrica.

A continuación, se procedió a instalar el sistema MQL, fijando el depósito y las boquillas en una ubicación óptima. También se realizaron las conexiones necesarias con el cuadro eléctrico de la talladora, para que el MQL funcionase de forma automática. Para conseguirlo, fue necesario programar el PLC ubicado en dicho cuadro eléctrico.

Una vez instalado el sistema MQL, se realizaron numerosas pruebas con el objetivo de comparar los resultados obtenidos al trabajar con aceite de corte y con MQL en la talladora.

Con este fin, se registraron las temperaturas alcanzadas en diferentes piezas y fresas al finalizar el ciclo de tallado. Además, gran número de piezas fueron verificadas por los operarios, y enviadas al laboratorio de control de engranajes, donde mediante un procedimiento de rodadura con patrón, se obtuvieron los correspondientes gráficos de tallado.

Sin embargo, las pruebas más importantes consistieron en comparar los desgastes de distintas fresas madre. Este punto resultó ser crucial, ya que si la reducción o eliminación de aceite de corte no venía acompañada de un aumento de la vida de las fresas, no se obtendría rentabilidad económica.

Los resultados obtenidos en todas estas pruebas se encuentran recogidos en el siguiente capítulo.



## *CAPÍTULO 8:*

## *ANÁLISIS DE RESULTADOS*



## 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 8.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se muestran los resultados de las pruebas que se llevaron a cabo con el sistema MQL. Tal y como se comentó en el capítulo anterior, dichas pruebas consistieron en tallar numerosas piezas con aceite de corte y con MQL, comparando las temperaturas alcanzadas en la zona de mecanizado, los gráficos de tallado y los desgastes producidos en las fresas madre.

La finalidad de estas pruebas fue comprobar la eficacia del sistema de lubricación por cantidades mínimas en el proceso de tallado por generación.

### 8.2 TEMPERATURA DE LAS PIEZAS Y GRÁFICOS DE TALLADO

El primer paso para comprobar que las piezas talladas con MQL eran válidas para producción, fue registrar las temperaturas alcanzadas en las piezas al finalizar el ciclo de tallado, es decir, en el instante posterior a la apertura de las puertas de la talladora.

Es importante destacar que la temperatura no era siempre la misma, sino que aumentaba al tallar varias piezas seguidas debido al calentamiento de las fresas. De esta manera, las temperaturas máximas mostradas a continuación fueron registradas después de que la talladora hubiese estado trabajando más de dos horas de forma continuada.

	Aceite de corte	MQL
CE-20126	38 - 39°C	40 - 41°C
CE-18223	38 - 39°C	41 - 42°C

**Tabla 8.1:** Temperaturas máximas registradas en las piezas CE-20126 y CE-18223 con aceite de corte y con MQL

Se puede observar como al utilizar el sistema MQL, las temperaturas registradas en las piezas son ligeramente mayores que al utilizar aceite de corte. Este hecho era previsible, ya que tal y como se comentó en el capítulo 5, la principal función



del sistema MQL es la lubricación, mientras que la principal función del aceite de corte es la refrigeración.

También se observa que al tallar con MQL, la pieza CE-18223 alcanza una temperatura ligeramente mayor que la pieza CE-20126, debido a que el módulo del dentado de la primera pieza es mucho mayor que el de la segunda.

En cualquier caso, las temperaturas registradas después de tallar con MQL estaban dentro de los límites previstos. El único efecto que podía tener el aumento de temperatura en las piezas estaba relacionado con las dilataciones térmicas.

Con el objetivo de contrastar las posibles diferencias dimensionales provocadas por estas dilataciones térmicas, los operarios verificaron cada una de las piezas a la salida de la talladora utilizando un micrómetro de platillos para el dentado y calibre de relación pasa/no pasa para el estriado.

Todas las piezas que tras ser talladas con MQL fueron verificadas por los operarios, presentaron unas dimensiones dentro de los límites de tolerancia, sin encontrar diferencia alguna respecto a las piezas talladas con aceite de corte.

Pero para ver si las piezas talladas con MQL realmente cumplían los criterios de calidad de John Deere Ibérica, éstas eran enviadas de forma periódica al laboratorio de control de engranajes, donde eran sometidas a un procedimiento de rodadura con patrón con el fin de obtener los correspondientes gráficos de tallado.

Estos gráficos fueron examinados cuidadosamente por técnicos del Departamento de Calidad, y en ningún momento se observó que las piezas talladas con MQL presentasen diferencia alguna respecto a las piezas talladas con aceite de corte, es decir, las piezas talladas con MQL cumplían con los criterios de calidad y por lo tanto eran válidas para producción.

A continuación se muestran a modo de ejemplo, los gráficos de tallado correspondientes a una pieza del modelo CE-18223 que fue tallada utilizando MQL.



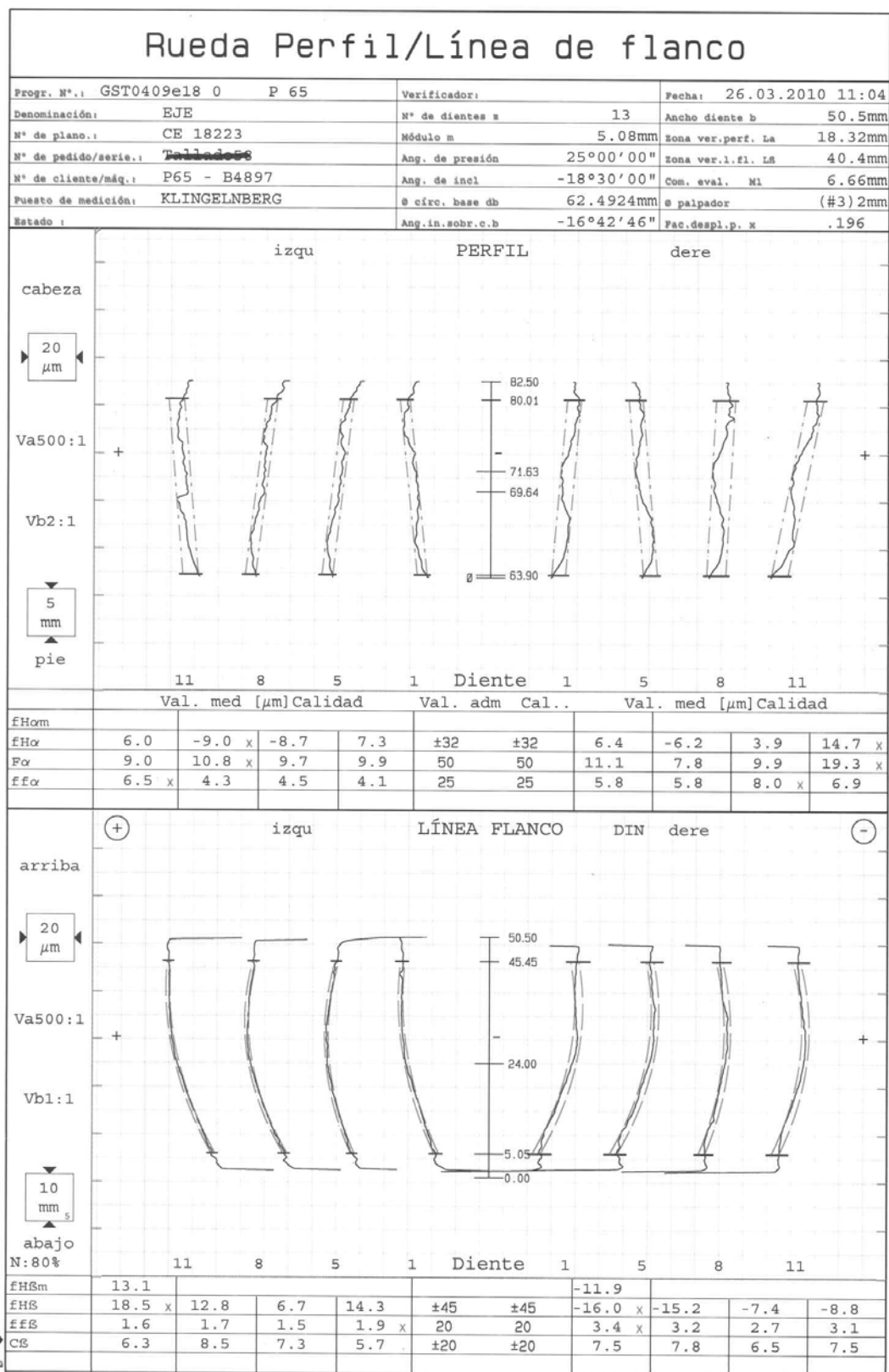


Figura 8.1: Gráficos de perfil de evolvente y línea de flanco de la pieza CE-18223

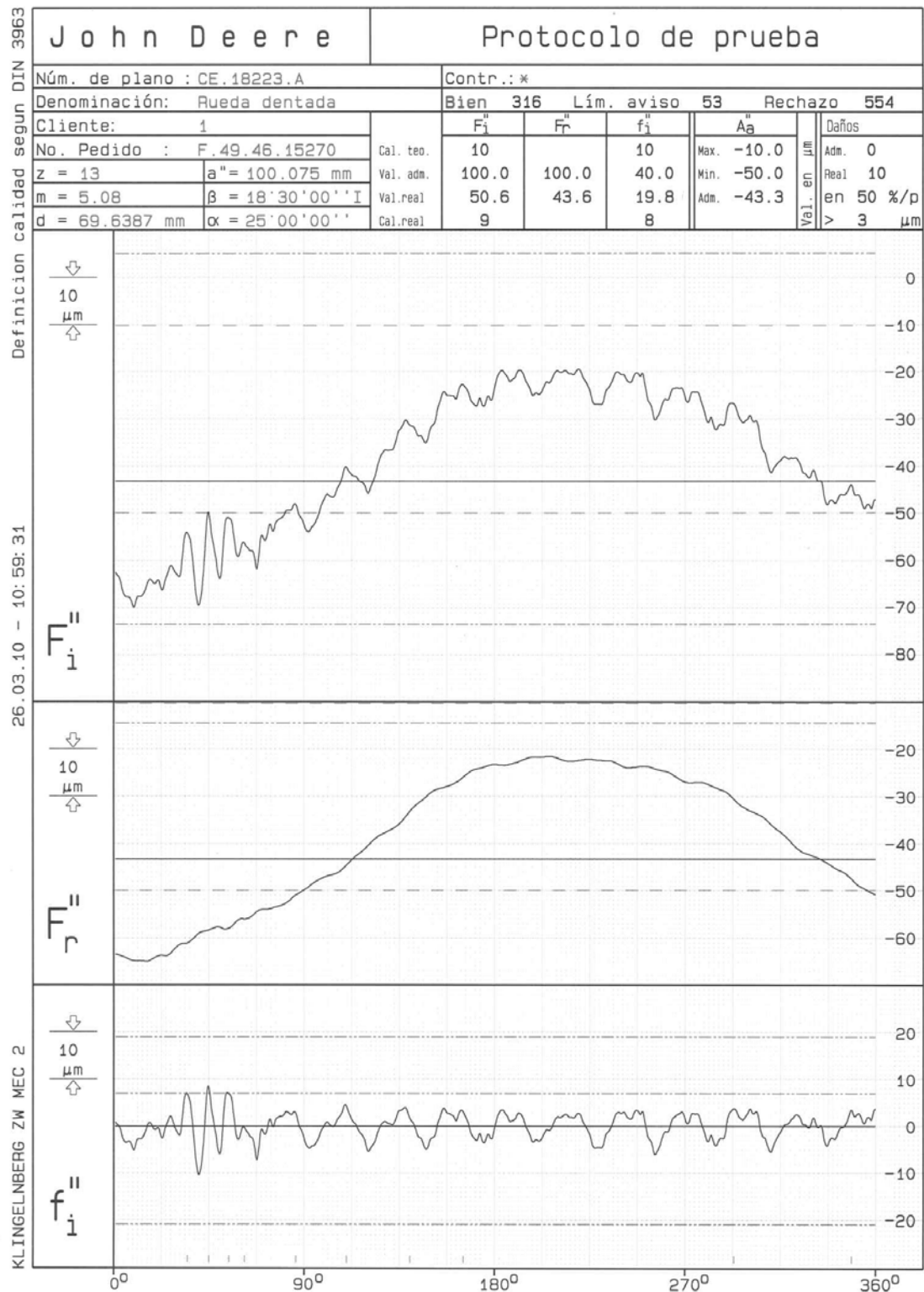


Figura 8.2: Gráficos de salto de rodadura de la pieza CE-18223



De esta manera, se comprobó que el sistema MQL no tiene efectos negativos sobre las piezas mecanizadas, siendo un sistema de lubricación válido para el proceso de tallado por generación.

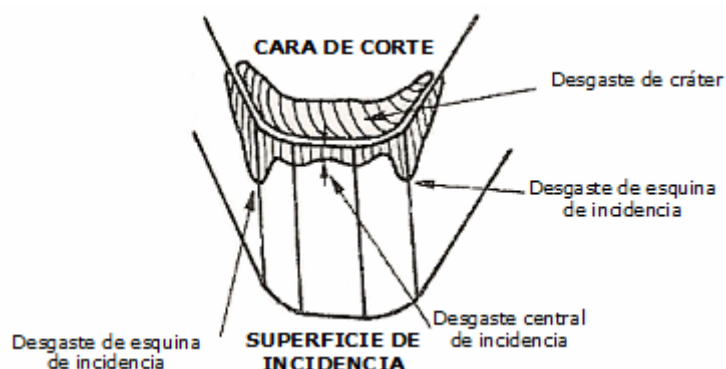
El siguiente paso fue comprobar el efecto del sistema MQL en el desgaste de las fresas, tal y como se describe a continuación.

### 8.3 ANÁLISIS DE LOS DESGASTES DE LAS FRESAS MADRE

Para analizar los desgastes de las diferentes fresas madre se siguió el siguiente procedimiento:

- Se tomaron imágenes de la cara de corte, la superficie de incidencia y los flancos laterales de distintos dientes en cada fresa. Para ello se utilizó un microscopio con 20 aumentos, el cual permitió la cuantificación de dichos desgastes.
- En cada una de las fresas, se analizaron siempre los tres dientes centrales de la fila donde se encontraba el chavetero. El objetivo buscado con este procedimiento, fue analizar la evolución del desgaste de los mismos dientes en cada fresa, para obtener unos resultados fiables.
- En cada análisis se realizó además, una inspección visual del resto de dientes de cada una de las fresas, de forma que también se tomaron imágenes al detectar un desgaste anómalo en alguno de ellos.

Con estas imágenes fue posible analizar el desgaste tipo abrasivo producido en la superficie de incidencia y el desgaste tipo cráter producido en la cara de corte de distintos dientes en cada fresa. En la Figura 8.3 se muestra un esquema de estos dos tipos de desgaste.



**Figura 8.3:** Esquema de los principales desgastes que tienen lugar en un diente de una fresa madre

Aunque lo deseable es que en la superficie de incidencia únicamente se produzca desgaste tipo abrasivo, es habitual encontrar pequeños mellados en el filo de algún diente que afecten a la superficie de incidencia. Estos mellados suelen tener mayor tamaño que el desgaste abrasivo, reduciendo por lo tanto la vida de la fresa madre.

El desgaste aparecido en la superficie de incidencia es la referencia que se utiliza para el afilado de las fresas. De esta manera, si por ejemplo un diente de la fresa presenta un mellado en la superficie de incidencia de 0,3 milímetros, aunque el desgaste del resto de dientes sea menor, será necesario eliminar esta longitud de cada uno de los dientes de dicha fresa.

Por otro lado, un elevado desgaste de cráter en un diente es indicativo de que existe riesgo de rotura del filo de dicho diente. Esto se debe a que al erosionarse el recubrimiento de la cara de corte el diente se debilita, y si aumenta la profundidad del cráter se puede producir un mellado o incluso una fractura de dicho diente.

En los siguientes apartados, se realiza un análisis de los desgastes obtenidos al tallar con aceite de corte y con MQL, en las cuatro fresas madre con las que se trabajó en este proyecto.

También se calcula en que porcentaje puede aumentar la vida de las fresas al utilizar el sistema MQL en base a los resultados obtenidos en el análisis de sus desgastes.



### 8.3.1 FRESA N-35-10-15381

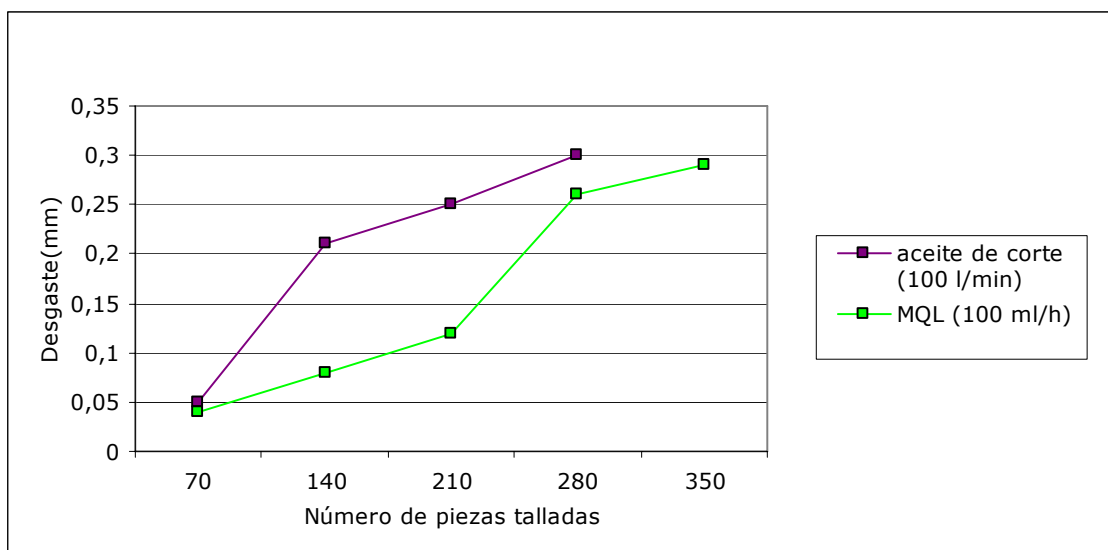
Con esta fresa, utilizada para el dentado de la pieza CE-18223, se talló un total de 280 unidades con aceite de corte. A continuación se tallaron 350 piezas con una fresa similar pero con el sistema MQL.

Los desgastes fueron registrados cada 70 piezas por ser la frecuencia con la que se completaba el shifting. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

- **DESGASTES EN LA SUPERFICIE DE INCIDENCIA**

En el siguiente gráfico se compara la evolución del desgaste producido en la superficie de incidencia al utilizar aceite de corte y MQL.

Es importante aclarar que los valores reflejados en este gráfico se corresponden con el máximo desgaste obtenido en cada una de estas fresas. Para obtener dichos valores, fue necesario analizar todos los dientes de cada fresa madre con el fin de saber cual era el que presentaba mayor desgaste en la superficie de incidencia.



**Figura 8.4:** Comparación de los desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-10-15381 al utilizar aceite de corte y MQL

En este gráfico se puede observar como la curva correspondiente al desgaste obtenido con MQL se encuentra siempre por debajo de la curva correspondiente al desgaste obtenido con aceite de corte.

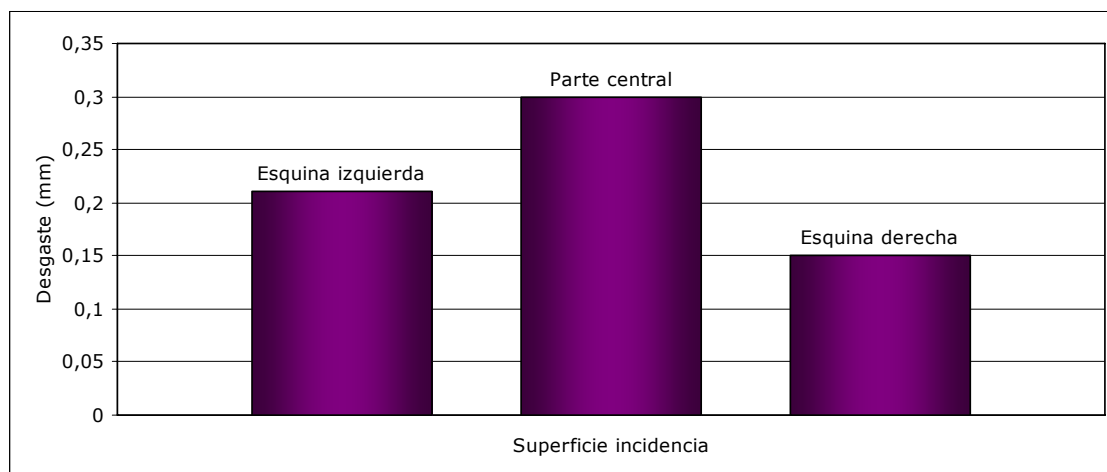


Habitualmente esta fresa se afila cada 210 piezas. Observando el gráfico tras tallar este número de piezas, el máximo desgaste producido con aceite de corte es de 0,25 milímetros, mientras que al utilizar MQL el máximo desgaste producido es inferior a 0,15 milímetros.

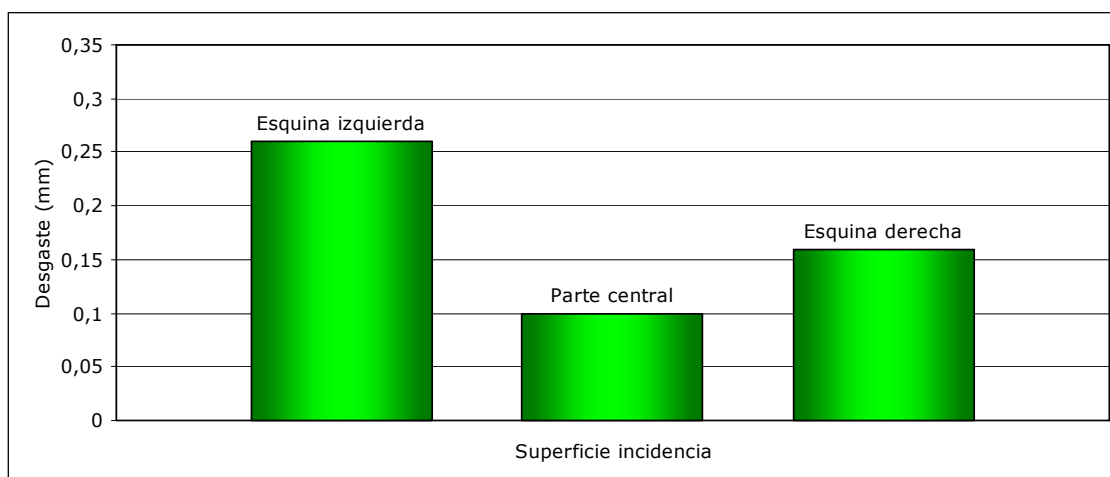
También se observa que al utilizar aceite de corte la máxima pendiente aparece entre las 70 y las 140 piezas, mientras que con MQL esta zona se encuentra entre las 210 y las 280 piezas. En ambos casos, la máxima pendiente refleja la aparición de mellas en el filo de algún diente. De esta forma, se puede deducir que los dientes comienzan a mellarse antes con aceite de corte que con MQL.

Es destacable que el máximo desgaste aparecido después de tallar 280 piezas con aceite de corte es de 0,3 milímetros, mientras que al tallar con MQL fue posible tallar 350 piezas alcanzando un desgaste ligeramente inferior a ese valor.

En los gráficos de las figuras 8.5 y 8.6 se muestra el máximo desgaste aparecido en la superficie de incidencia, tanto en la parte central (cresta del diente) como en las esquinas de los flancos laterales, después de tallar 280 piezas con aceite de corte y con MQL.



**Figura 8.5:** Desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-10-15381 tras tallar 280 piezas con aceite de corte



**Figura 8.6:** Desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-10-15381 tras tallar 280 piezas con MQL

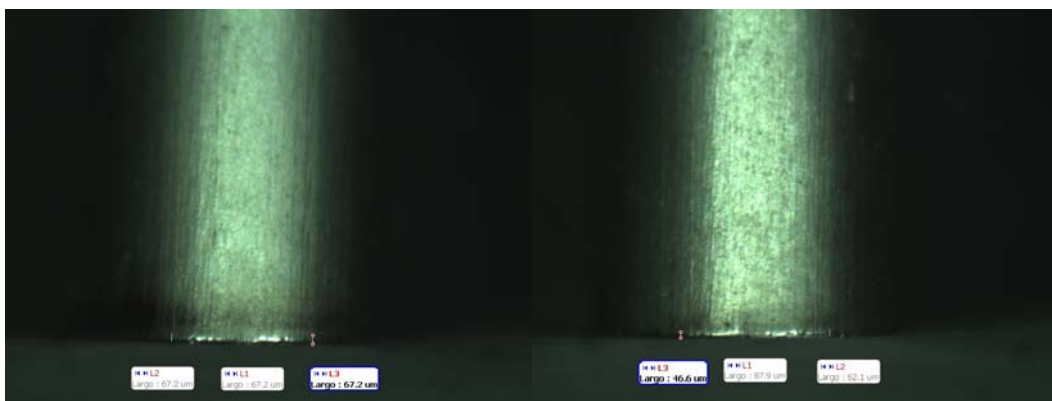
Es importante destacar que estos desgastes no corresponden a un único diente, sino que son los máximos desgastes obtenidos al analizar todos los dientes de cada una de las fresas madre, independientemente de que se encontrasen o no en un mismo diente.

A continuación se muestran algunas imágenes de los desgastes producidos en la superficie de incidencia de distintos dientes, tras haber tallado 280 piezas con aceite de corte y con MQL. En ellas se observa como algunos dientes han comenzado a mellarse.

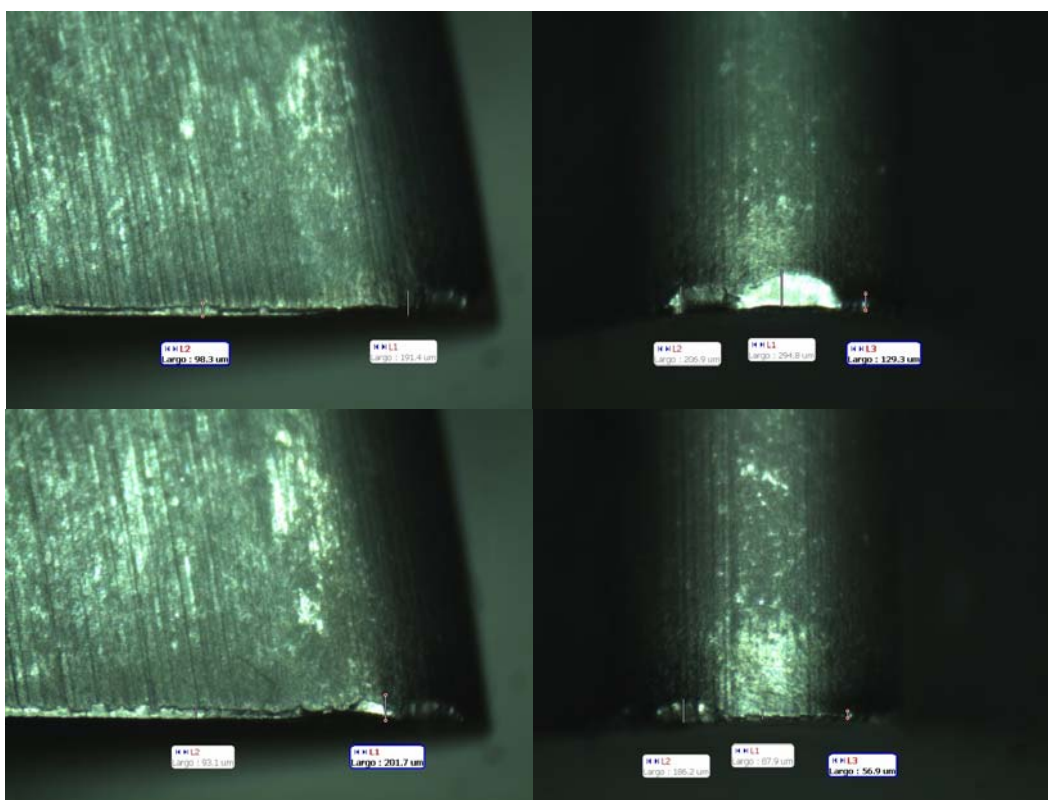


**Figura 8.7:** Imágenes de la zona central de la superficie de incidencia de dos dientes que presentaban desgaste abrasivo tras tallar 280 piezas con aceite de corte



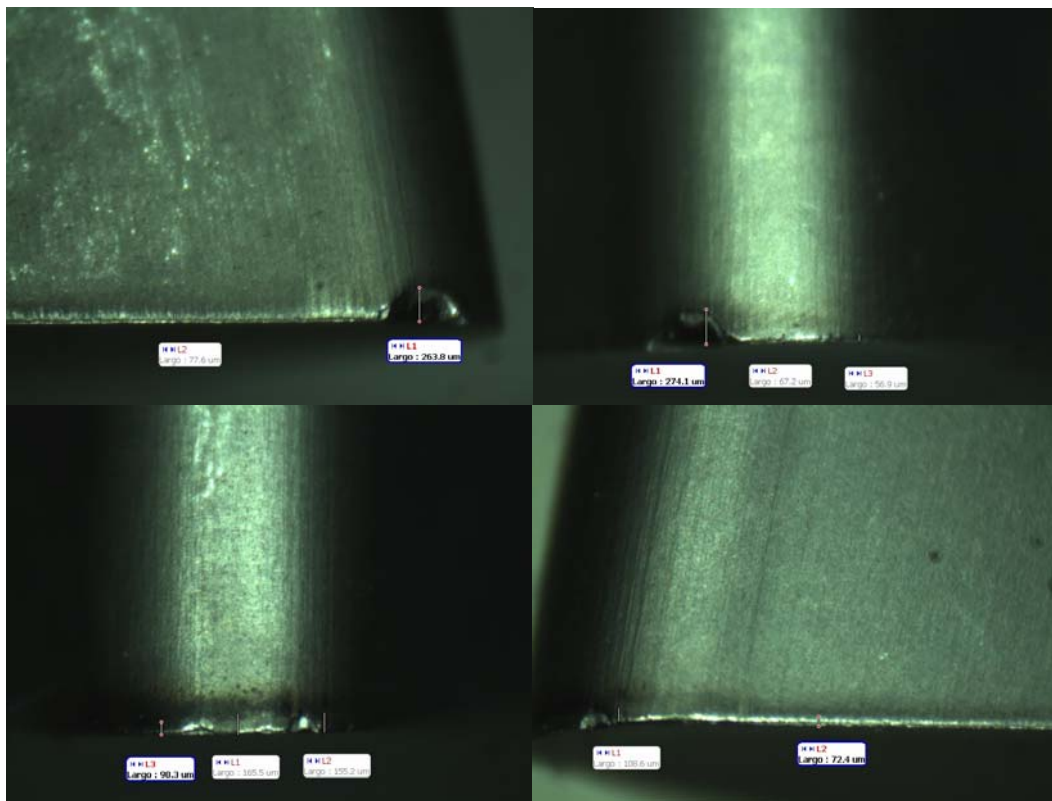


**Figura 8.8:** Imágenes de la zona central de la superficie de incidencia de dos dientes que presentaban desgaste abrasivo tras tallar 280 piezas con MQL



**Figura 8.9:** Imágenes de la esquina izquierda y de la zona central de la superficie de incidencia de los dos dientes que presentaban mayores mellados tras tallar 280 piezas con aceite de corte





**Figura 8.10:** Imágenes de la zona central y de las esquinas de la superficie de incidencia de los dos dientes que presentaban mayores mellados tras tallar 280 piezas con MQL

En estas imágenes, se observa que el tamaño de las mellas aparecidas en los dientes de las fresas es ligeramente inferior en el caso de utilizar MQL.

Sin embargo, la principal diferencia se encuentra en el desgaste abrasivo. Al utilizar aceite de corte se observa un desgaste abrasivo mucho mayor que al utilizar MQL. Este efecto se observó en la superficie de incidencia de todos los dientes que fueron analizados.

En las anteriores imágenes también se aprecia como en las zonas alejadas del filo, los dientes que trabajaron con aceite de corte presentan más brillo que los dientes de las fresas que trabajaron con MQL. Este efecto es debido a que al utilizar el sistema MQL se facilita la salida de la viruta gracias al aire comprimido, de forma que ésta erosiona en menor medida el recubrimiento de TiCN.

Incluso después de tallar 350 piezas con MQL (Figura 8.11), el desgaste abrasivo producido en la superficie de incidencia fue mucho menor que el desgaste abrasivo observado después de tallar 280 piezas con aceite de corte.



**Figura 8.11:** Imágenes de la zona central de la superficie de incidencia de dos dientes que presentaban desgaste abrasivo tras tallar 350 piezas con MQL

Todos estos resultados indican que el sistema MQL lubrica mejor la zona de contacto entre la fresa madre y la pieza de trabajo, además de disminuir el rozamiento entre las virutas desprendidas y la fresa.

En las figuras 8.12 y 8.13 se muestran imágenes de las dos fresas después de tallar 280 piezas con aceite de corte y con MQL respectivamente. En ellas se puede apreciar como la fresa que talló con aceite de corte, presenta mayores abrasiones en los flancos de los dientes que la que talló con MQL.



**Figura 8.12:** Imágenes de la fresa N-35-10-15381 después de tallar 280 piezas con aceite de corte

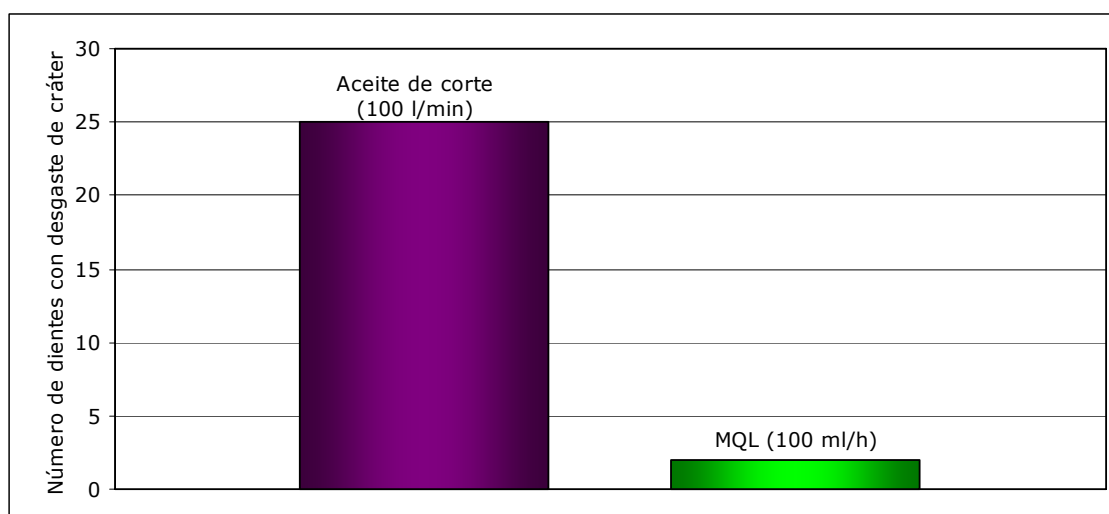


**Figura 8.13:** Imágenes de la fresa N-35-10-15381 después de tallar 280 piezas con MQL

- **DESGASTES EN LA CARA DE CORTE**

En la cara de corte de los dientes de esta fresa se apreciaron notables diferencias al tallar con aceite de corte y con MQL. Después de haber tallado 280 piezas, la fresa que trabajó con aceite de corte presentaba desgaste tipo cráter en la mayoría de sus dientes, mientras que en la fresa que talló con MQL únicamente se apreciaron dos dientes con desgaste en la cara de corte.

En el siguiente gráfico se muestra una representación del número de dientes en los que apareció desgaste tipo cráter después de tallar 280 piezas con aceite de corte y con MQL.



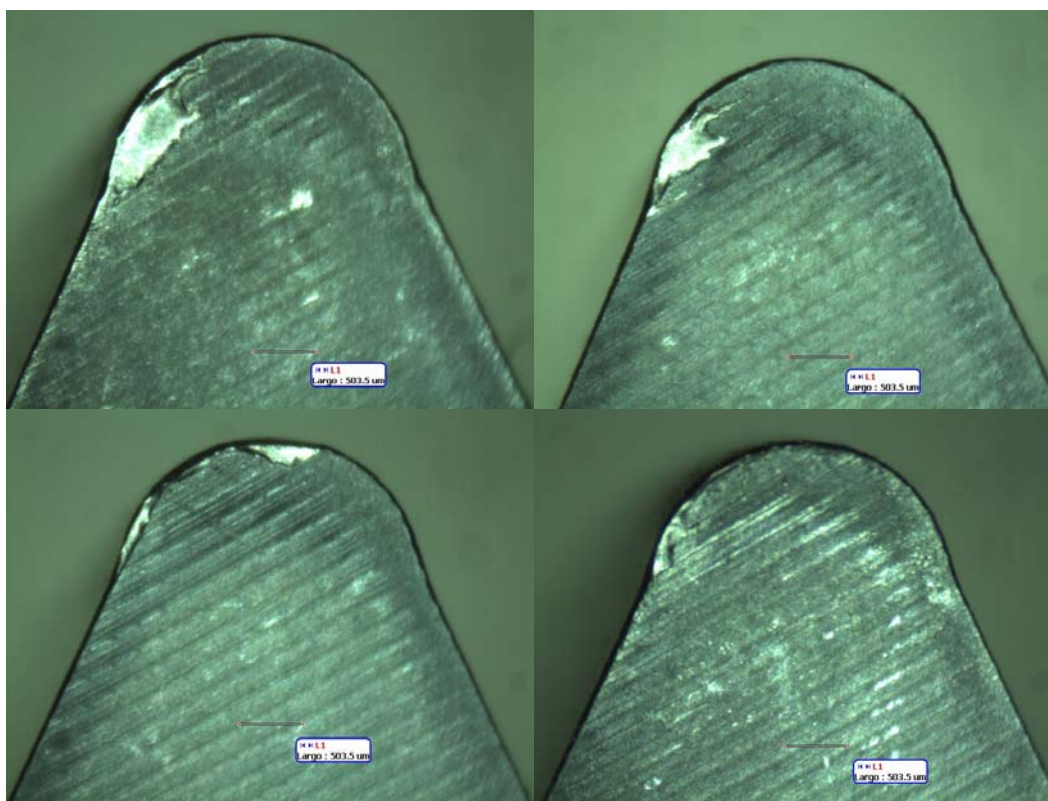
**Figura 8.14:** Comparación del número de dientes de cada fresa con desgaste de cráter después de tallar 280 piezas con aceite de corte y con MQL



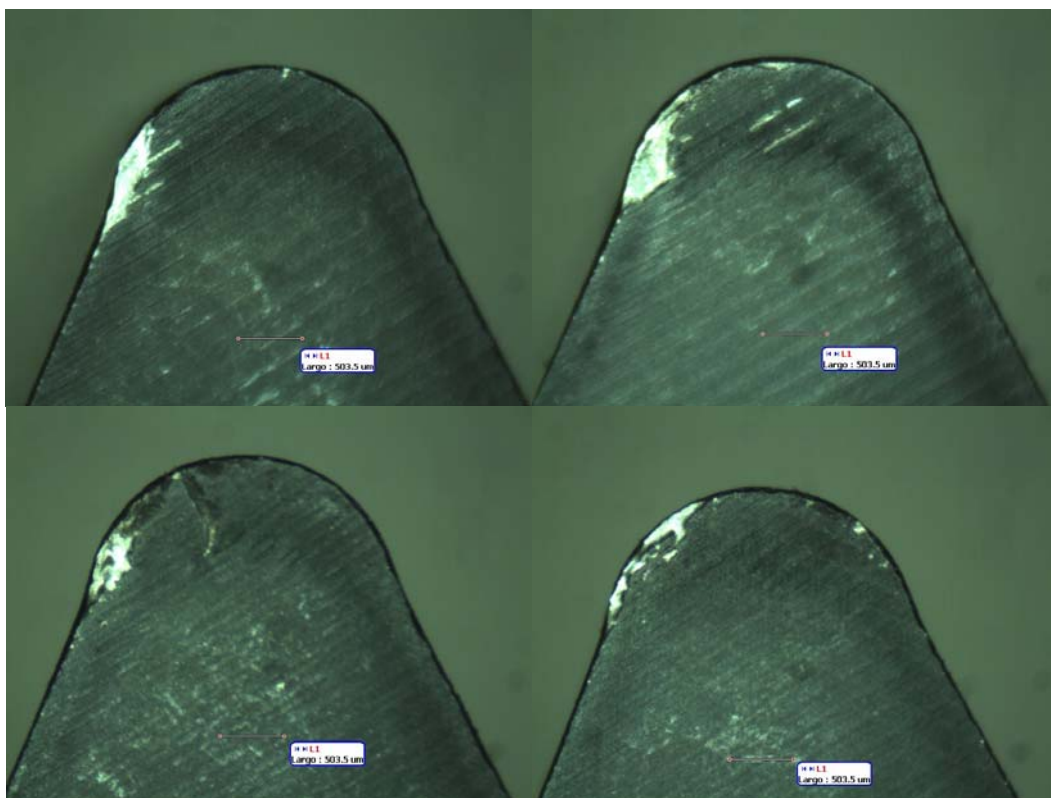
Debido al elevado número de dientes con desgaste de cráter, y al tamaño considerable de algunos de ellos, tanto los preparadores de la máquina, como los ingenieros de producción, desaconsejaron que la fresa que trabajó con aceite de corte realizara un nuevo shifting (70 piezas más), ya que existía riesgo de rotura de sus dientes.

En cambio, con la fresa que talló con MQL, dado que la práctica totalidad de sus dientes no presentaban desgaste de cráter, sí fue posible realizar otro shifting más, alcanzando las 350 piezas.

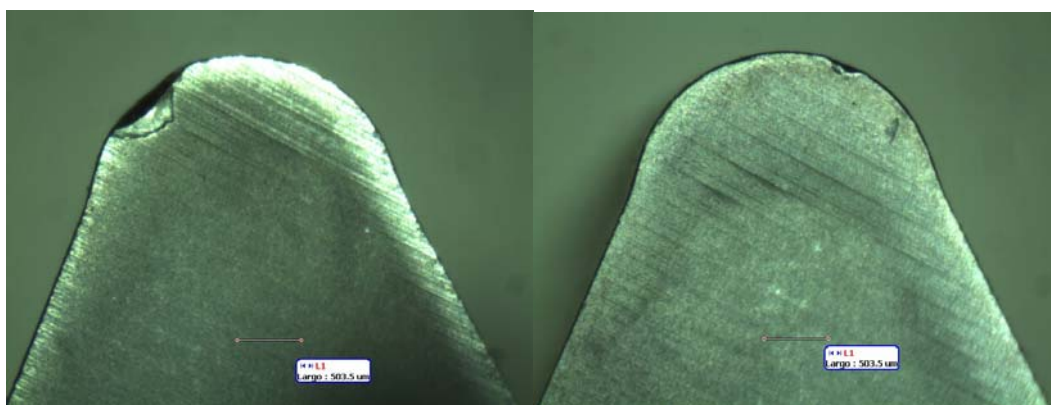
En las siguientes figuras se pueden observar los desgastes aparecidos en la cara de corte de diversos dientes después de haber tallado 280 piezas con aceite de corte y con MQL.







**Figura 8.15:** Imágenes de algunos de los numerosos dientes afectados con desgaste de cráter tras tallar 280 piezas con aceite de corte



**Figura 8.16:** Imágenes de los dos únicos dientes en los que apareció desgaste de cráter tras tallar 280 piezas con MQL

En las imágenes anteriores se comprueba como al utilizar aceite de corte, en muchos dientes aparecen desgastes de cráter de tamaño considerable, mientras que al utilizar MQL, los únicos desgastes tipo cráter están relacionados con la aparición de algún mellado.



Incluso después de tallar 350 piezas con MQL, no aparecieron desgastes tipo cráter, salvo los mostrados en la Figura 8.16, pero su forma y tamaño no presentaron alteraciones importantes.

- **AUMENTO EN LA VIDA DE LA FRESA N-35-10-15381**

Para obtener en qué porcentaje aumenta la vida de esta fresa al utilizar el sistema MQL, hay que tener en cuenta tanto la frecuencia de afilado como el número de afilados que se realizan en la fresa antes de que sea desechada.

La frecuencia habitual de afilado al utilizar aceite de corte es de 3 shiftings, es decir, 210 piezas. Esta frecuencia se basa en la experiencia de los preparadores e ingenieros de producción, ya que en ocasiones han tenido problemas de rotura de algún diente al tallar más de 210 piezas con aceite de corte.

Sin embargo, a partir de los resultados obtenidos en los desgastes de la misma fresa al trabajar con MQL, se llegó a la conclusión de que con este sistema de lubricación es posible realizar el afilado cada 350 piezas (5 shiftings) sin que exista peligro de rotura de sus dientes. Esta decisión fue consensuada por preparadores e ingenieros de producción.

El afilado de esta fresa madre se lleva a cabo en el Departamento de Herramientas de John Deere Ibérica. En cada operación de afilado se realizan diversas pasadas de desbaste y acabado, eliminando un total de 0,455 milímetros en cada diente, siempre y cuando el máximo desgaste en la superficie de incidencia sea menor que esta longitud.

Si en cada afilado se elimina esta cantidad de material, a lo largo de la vida de esta fresa madre se realiza un total de 10 afilados. En el caso de obtenerse algún desgaste anómalo de forma que fuese necesario eliminar mayor cantidad de material, el número de afilados disminuiría.

De acuerdo con los datos del Figura 8.4, donde se muestra la evolución de los desgastes de las fresas entre dos afilados consecutivos, si al tallar con aceite de corte se afila esta fresa con la frecuencia habitual, es decir, tras completar 3 shiftings (210 piezas), se observa que el máximo desgaste es de 0,25 milímetros,



inferior a los 0,455 milímetros que se eliminan en cada afilado.

Dado que se realiza un total de 10 afilados antes de que sea desechada, esta fresa tiene una vida de 2310 piezas al utilizar aceite de corte.

$$210 \text{ piezas} + 10 \text{ afilados} \cdot 210 \text{ piezas} / \text{afilado} = 2310 \text{ piezas}$$

Con el sistema MQL, el máximo desgaste que aparece después de tallar 350 piezas es de 0,29 milímetros, también inferior a los 0,455 milímetros a eliminar. Como la frecuencia de afilado es de 350 piezas, utilizando el sistema MQL la vida de esta fresa madre sería de 3850 piezas.

$$350 \text{ piezas} + 10 \text{ afilados} \cdot 350 \text{ piezas} / \text{afilado} = 3850 \text{ piezas}$$

Por lo que con el sistema MQL se conseguiría un aumento de un 67% en la vida de esta fresa.

$$\frac{3850 \text{ piezas}}{2310 \text{ piezas}} \cdot 100 = 167\%$$

Es necesario destacar que estos resultados no son exactos, ya que no siempre se produce el mismo desgaste al tallar un número determinado de piezas, sea con MQL o con aceite de corte. En ocasiones puede aparecer un mellado en algún diente que sea mayor de 0,455 milímetros o incluso puede fracturarse algún diente, reduciendo drásticamente la vida de la fresa madre.

No obstante, en las pruebas realizadas tanto con aceite de corte como con MQL, los máximos desgastes producidos en la superficie de incidencia de los dientes, presentaban unas dimensiones comprendidas entre 0,2 y 0,3 milímetros en el instante en que fueron enviadas a afilar.

Los resultados obtenidos se corresponden por tanto, con el desgaste admisible mostrado en la Figura 4.22 perteneciente al Capítulo 4 (Tallado de engranajes).



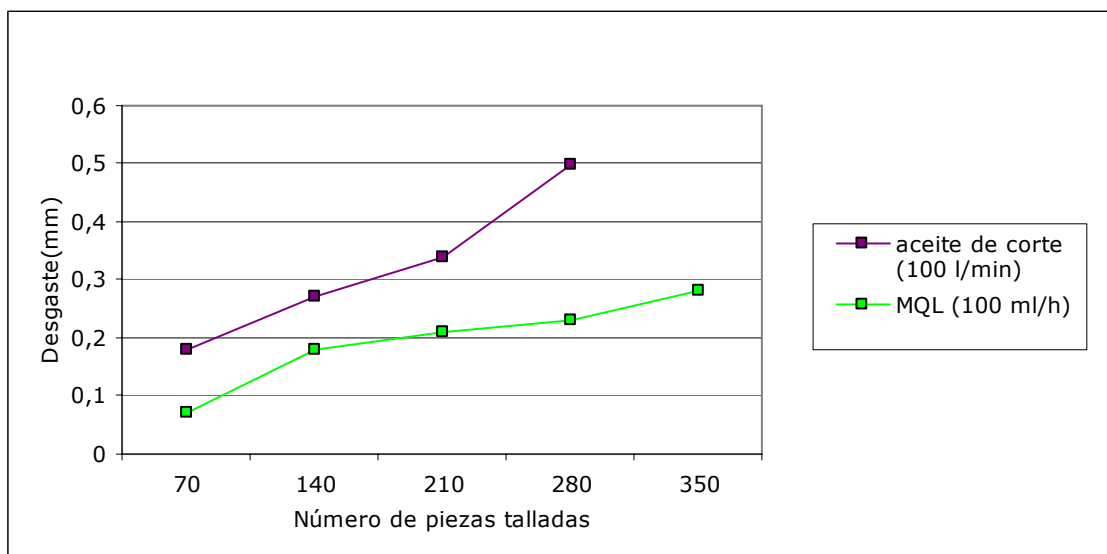
### 8.3.2 FRESA N-35-10-15305

Esta fresa es utilizada para realizar el estriado de la pieza CE-18223, por lo que al igual que en el caso anterior se talló un total de 280 piezas con aceite de corte y 350 piezas con MQL, registrando los desgastes cada 70 piezas por ser la frecuencia con la que se completaba el shifting.

Sin embargo, dado que esta fresa realiza un estriado, la forma sus dientes es muy distinta a la de los dientes de la anterior fresa. Como consecuencia, el tamaño y la forma de los desgastes que aparecen también son distintos. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

- **DESGASTES EN LA SUPERFICIE DE INCIDENCIA**

En el siguiente gráfico se compara la evolución del máximo desgaste producido en la superficie de incidencia de los dientes de cada una de las fresas, al utilizar aceite de corte y MQL.



**Figura 8.17:** Comparación de los desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-10-15305 al utilizar aceite de corte y MQL

En el gráfico se aprecia claramente como el desgaste producido cuando se utiliza aceite de corte es muy superior al desgaste producido cuando se utiliza MQL. Además, la diferencia aumenta a medida que se talla mayor número de piezas.



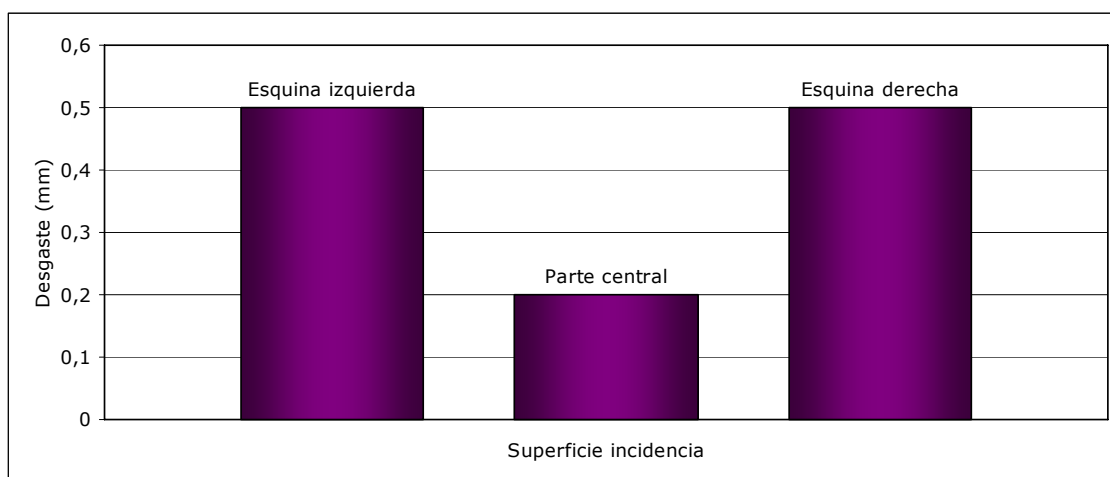


Esta fresa se afila habitualmente cada 210 piezas. Observando el gráfico en este número de piezas talladas, el máximo desgaste obtenido con aceite de corte es de 0,34 milímetros, mientras que con MQL el máximo desgaste es de 0,21 milímetros.

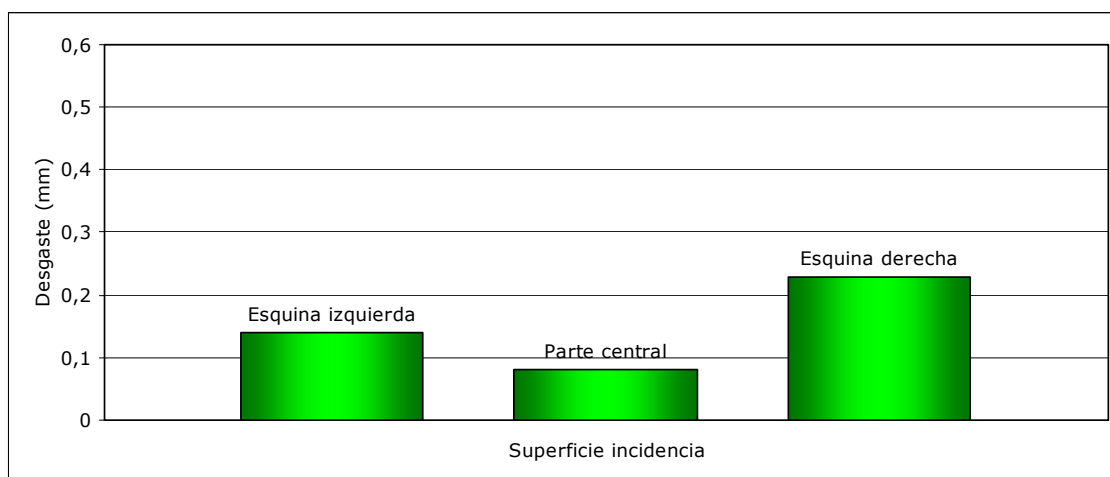
Sin embargo, después de tallar 280 piezas con aceite de corte el desgaste aumentó hasta 0,5 milímetros. Esta longitud es incluso superior a los 0,455 milímetros que se eliminan en un ciclo patrón de afilado. En cambio utilizando el sistema MQL, el máximo desgaste fue de 0,23 milímetros inferior a la mitad del desgaste producido con aceite de corte.

Por estos motivos únicamente fue posible completar un quinto shifting con MQL, tallando un total de 350 piezas. El máximo desgaste después de tallar esta cantidad de piezas no alcanzó los 0,3 milímetros.

En las figuras 8.18 y 8.19 se muestra el desgaste máximo obtenido en la superficie de incidencia, tanto en la parte central como en las esquinas de los flancos laterales de los dientes, después de tallar 280 piezas con aceite de corte y con MQL.



**Figura 8.18:** Desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-10-15305 tras tallar 280 piezas con aceite de corte

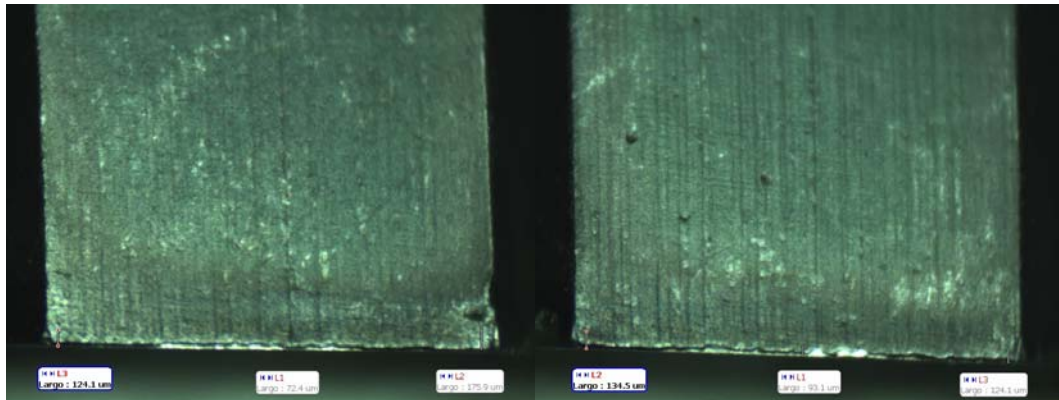


**Figura 8.19:** Desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-10-15305 tras tallar 280 piezas con MQL

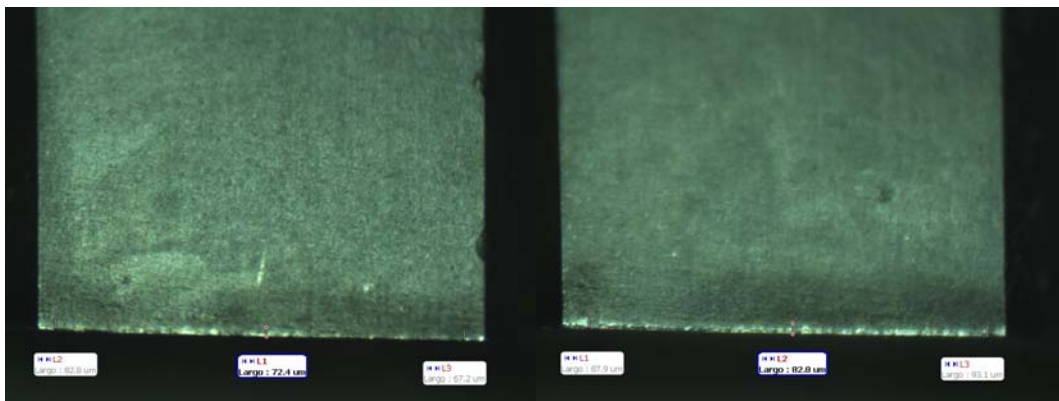
En estas figuras se observa que tanto en la parte central de la superficie de incidencia como en ambas esquinas, el máximo desgaste obtenido al utilizar MQL es inferior a la mitad del máximo desgaste producido al utilizar aceite de corte.

También se aprecia como los mayores desgastes en ambos casos aparecen en las esquinas de la superficie de incidencia de los dientes. La explicación de este fenómeno está relacionada con la forma de dichos dientes, ya que esta fresa madre se utiliza para tallar estriados. Por ello, la superficie de incidencia forma prácticamente un ángulo recto con los flancos laterales, lo que provoca que en las esquinas de los dientes aparezcan elevadas concentraciones de tensiones, dando lugar a mellas.

A continuación se muestran algunas imágenes de los desgastes abrasivos producidos en la superficie de incidencia de distintos dientes, después de haber tallado 280 piezas con aceite de corte y con MQL.

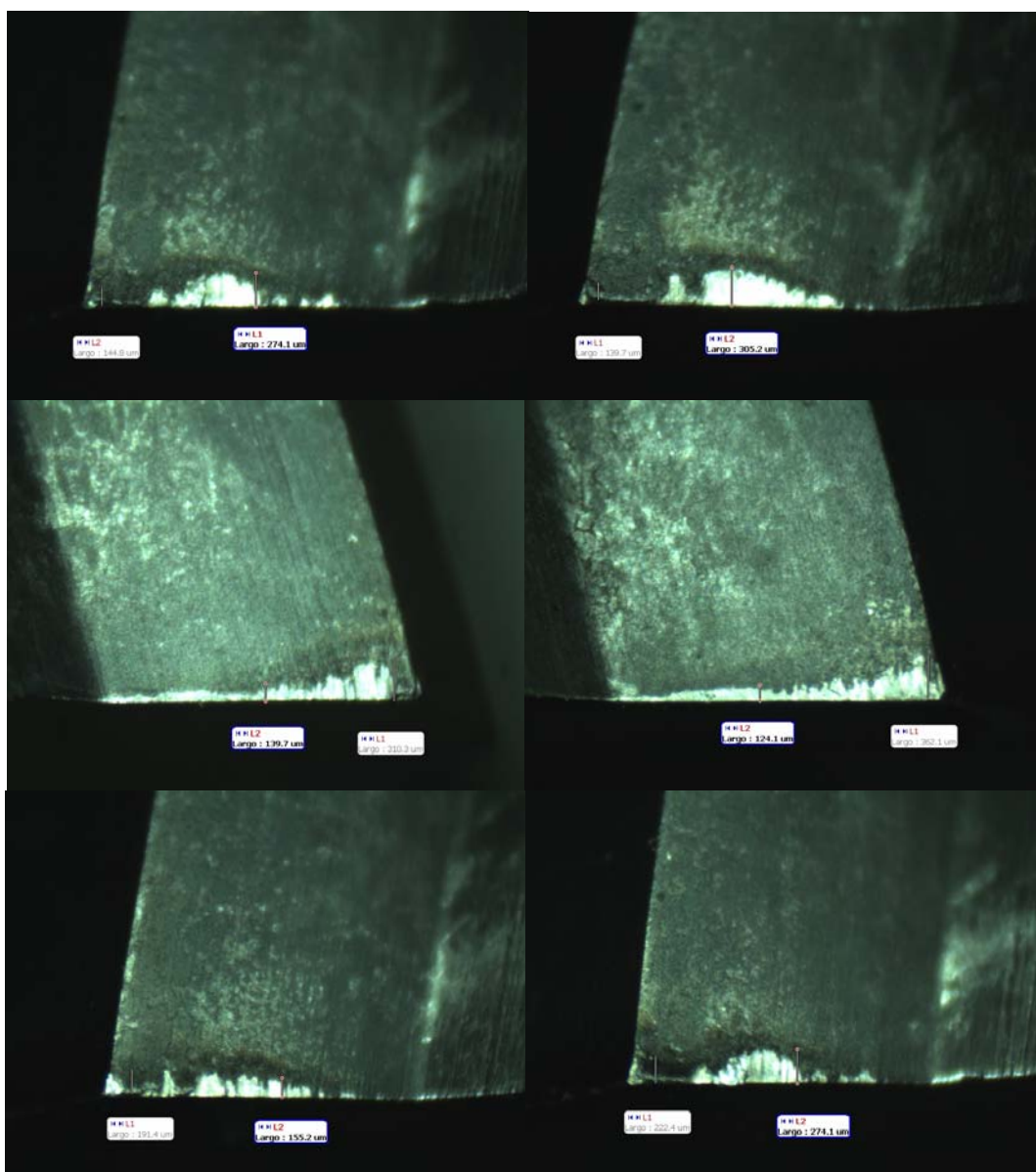


**Figura 8.20:** Imágenes de los desgastes abrasivos aparecidos en la superficie de incidencia de dos dientes tras tallar 280 piezas con aceite de corte

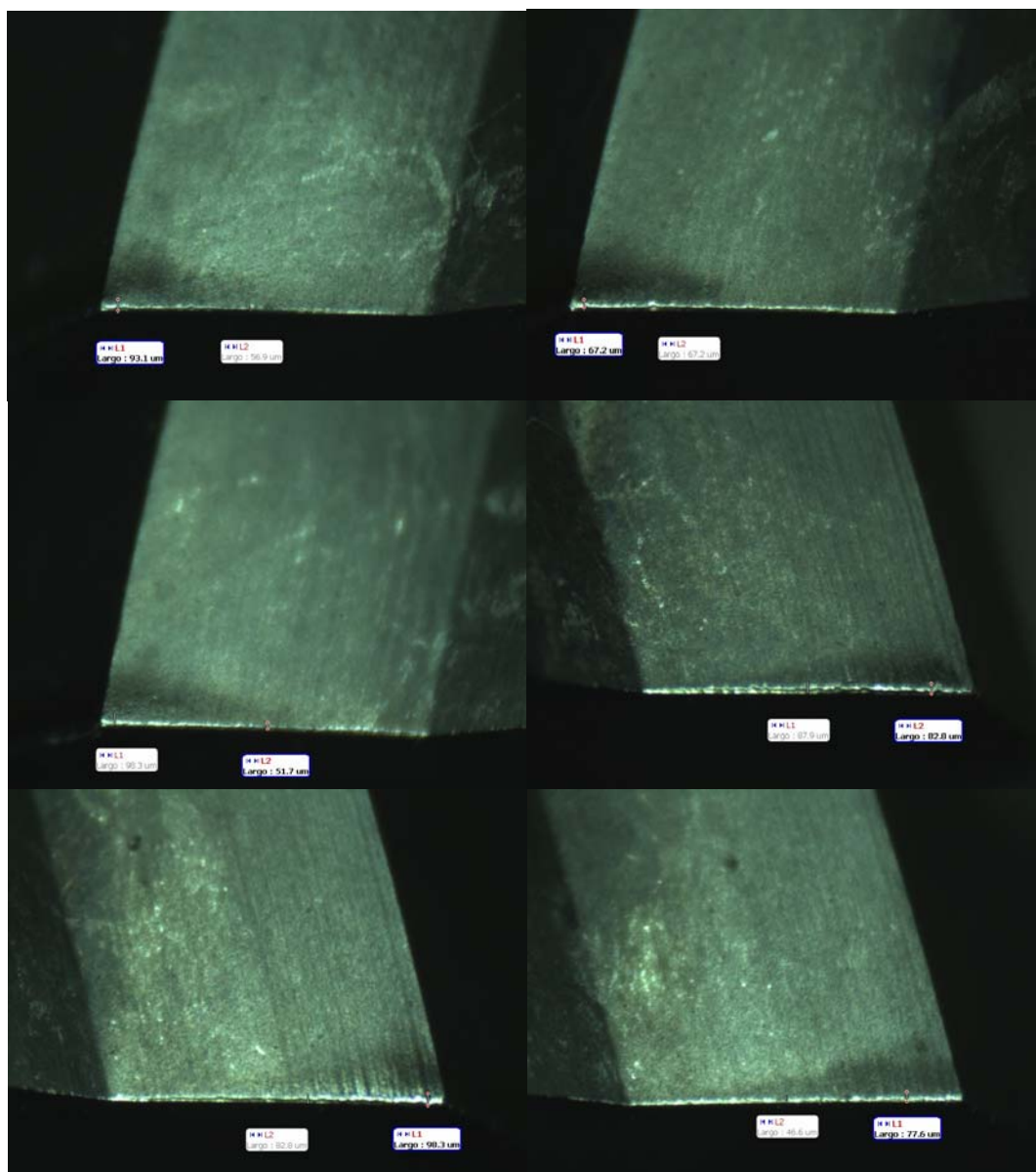


**Figura 8.21:** Imágenes de los desgastes abrasivos aparecidos en la superficie de incidencia de dos dientes tras tallar 280 piezas con MQL

Sin embargo, el mayor desgaste abrasivo en esta fresa madre se produce en los flancos laterales de los dientes, tal como se muestra en las siguientes imágenes.



**Figura 8.22:** Imágenes de algunos desgastes abrasivos producidos en los flancos laterales de diferentes dientes tras tallar 280 piezas con aceite de corte



**Figura 8.23:** Imágenes de algunos desgastes abrasivos producidos en los flancos laterales de diferentes dientes tras tallar 280 piezas con MQL

En estas imágenes, se comprueba claramente que el desgaste abrasivo producido en los dientes es mucho mayor si se utiliza aceite de corte que si se utiliza MQL.

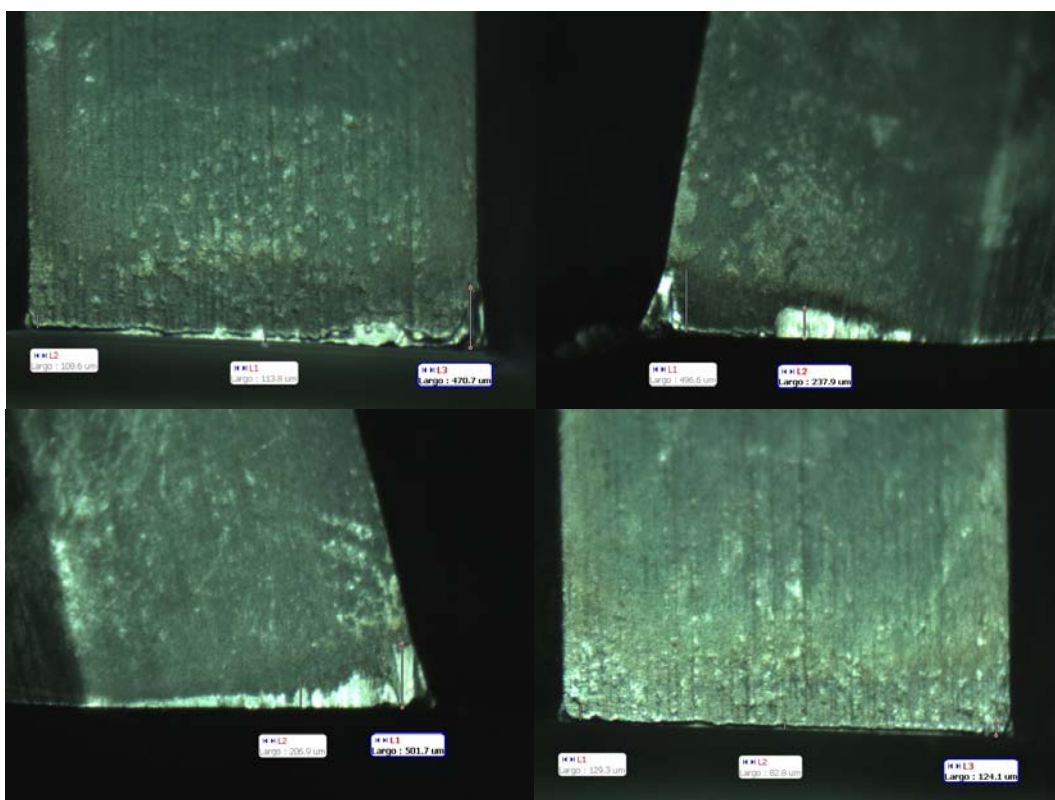
También se observa que al utilizar aceite de corte, los flancos de los dientes sufren mayor desgaste abrasivo que la superficie de incidencia.



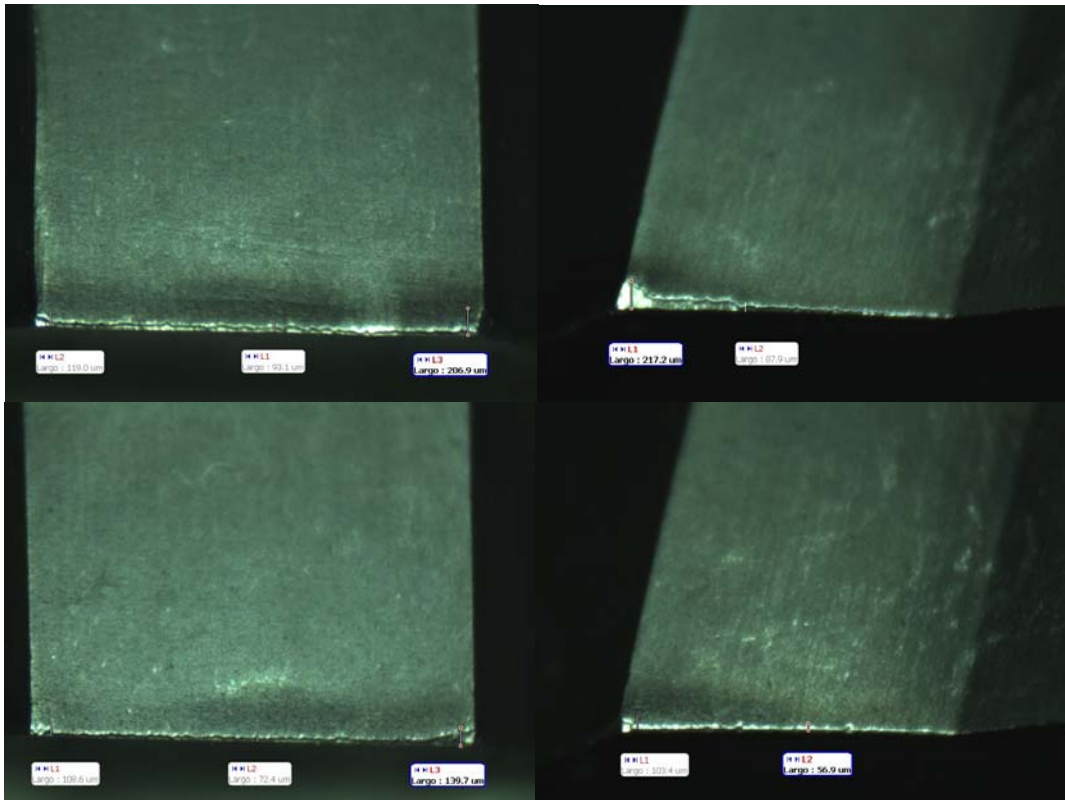


En las siguientes imágenes, se muestran los mayores mellados que fueron registrados con aceite de corte y con MQL después de haber tallado 280 piezas.

En ambos casos, estos desgastes aparecen en las esquinas de los dientes, sin embargo las mellas aparecidas al utilizar aceite de corte son mucho más grandes que las mellas aparecidas al utilizar MQL.



**Figura 8.24:** Imágenes de la parte central y de los flancos laterales de los dos dientes que presentaban mayores mellados en sus esquinas tras tallar 280 piezas con aceite de corte



**Figura 8.25:** Imágenes de la parte central y del flanco lateral derecho de los dos dientes en los que se observaron mayores mellados de esquina tras tallar 280 piezas con MQL

A continuación se muestran unas imágenes de estas fresas después de haber tallado 280 piezas con aceite de corte y con MQL. En ellas se puede observar como el recubrimiento de la fresa que trabajó con aceite de corte presenta mayores abrasiones que el de la fresa que trabajó con MQL.



**Figura 8.26:** Imágenes de la fresa N-35-10-15305 tras tallar 280 piezas con aceite de corte



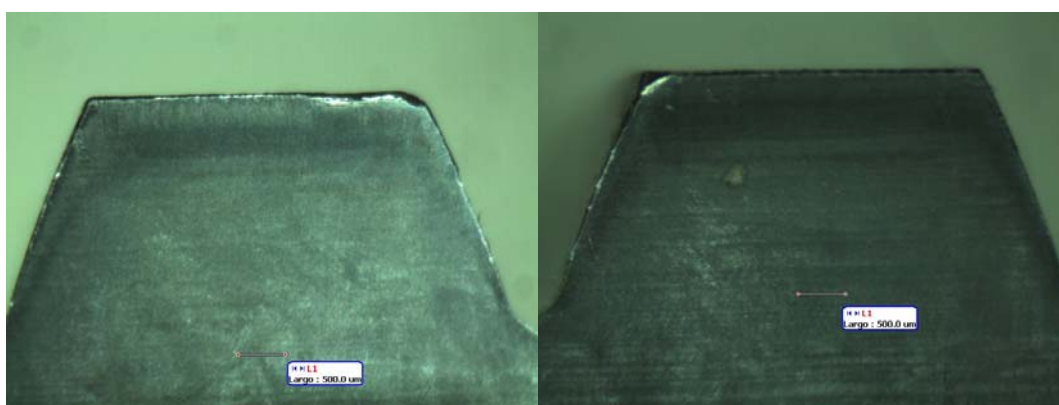


**Figura 8.27:** Imágenes de la fresa N-35-10-15305 tras tallar 280 piezas con MQL

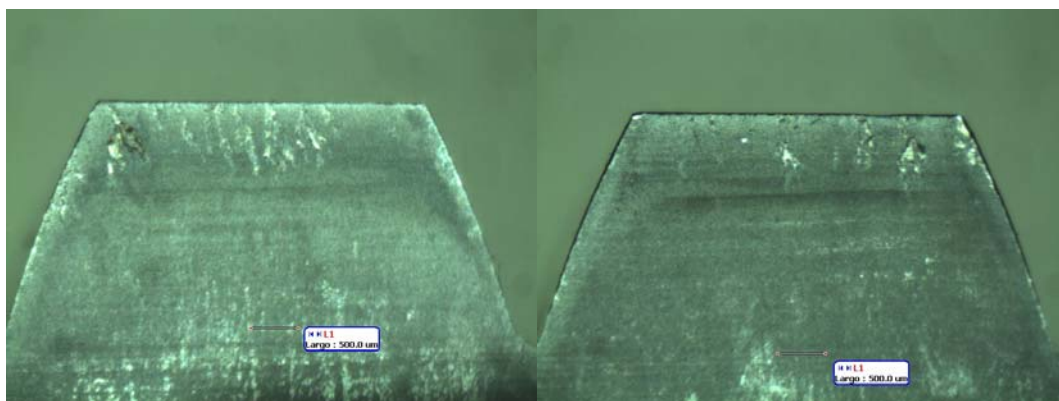
- **DESGASTES EN LA CARA DE CORTE**

En este tipo de fresa madre, el desgaste tipo cráter no aparece de manera clara. Únicamente en algunos dientes en los que se ha producido algún mellado, se observa que la cara de corte está afectada por la profundidad de dicho mellado.

También se aprecian algunos arañazos sobre el recubrimiento de la cara de corte, que podrían dar lugar a un desgaste de cráter si se continuaran tallando más piezas, pero tras completar 4 shiftings ningún diente presenta cráter totalmente formado.



**Figura 8.28:** Imágenes de los desgastes producidos en la cara de corte de dos dientes tras tallar 280 piezas con aceite de corte



**Figura 8.29:** Imágenes de los desgastes producidos en la cara de corte de dos dientes tras tallar 280 piezas con MQL

En las imágenes anteriores, se observa que en esta ocasión al utilizar MQL aparecen mayores abrasiones en la cara de corte que al utilizar aceite de corte. Sin embargo no llega a aparecer un cráter como tal, por lo que los dientes no presentan peligro ni de mellado ni de fractura.

También se aprecia como la cara de corte de los dientes que trabajaron con aceite de corte, está más afectada por mellados que los dientes que trabajaron con MQL.

Después de tallar 350 piezas con MQL, las abrasiones aparecidas en la cara de corte de los dientes eran ligeramente mayores, pero en ningún diente apareció un cráter totalmente formado.

El hecho de que en esta fresa no aparezca desgaste de cráter se explica porque a diferencia del caso anterior, esta fresa se utiliza para tallar un estriado. Por lo tanto, el tamaño de viruta es mucho menor y no da lugar a la formación de cráter.

- **AUMENTO EN LA VIDA DE LA FRESA N-35-10-15305**

De igual manera que en la anterior fresa, al utilizar aceite de corte la frecuencia habitual de afilado de esta fresa es de 3 shiftings, es decir, 210 piezas.

Sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos en los desgastes de la misma fresa al trabajar con MQL, se llegó a la conclusión de que con este sistema de lubricación es posible realizar el afilado cada 350 piezas (5 shiftings) sin que



exista peligro de rotura de sus dientes.

El afilado de esta fresa también se realiza de forma similar al caso anterior, eliminando una longitud de 0,455 milímetros de cada diente, y realizando un total de 10 afilados antes de que la fresa sea desechada.

Al utilizar aceite de corte, de acuerdo con la Figura 8.17 el máximo desgaste aparecido después de tallar 210 piezas es 0,34 milímetros, inferior a 0,455 milímetros.

Como se tallan 210 piezas entre dos afilados, la fresa madre tiene una vida de 2310 piezas al tallar con aceite de corte.

$$210 \text{ piezas} + 10 \text{ afilados} \cdot 210 \text{ piezas} / \text{afilado} = 2310 \text{ piezas}$$

Al utilizar MQL, después de haber tallado 350 piezas el máximo desgaste que aparece es de 0,28 milímetros, inferior al máximo desgaste observado al tallar con aceite de corte 140 piezas menos.

De esta forma, si con esta fresa madre se tallan 350 piezas entre dos afilados, al trabajar con el sistema MQL se obtiene una vida de 3850 piezas.

$$350 \text{ piezas} + 10 \text{ afilados} \cdot 350 \text{ piezas} / \text{afilado} = 3850 \text{ piezas}$$

Se alcanzaría así un aumento en la vida de esta fresa madre de un 67%.

$$\frac{3850 \text{ piezas}}{2310 \text{ piezas}} \cdot 100 = 167\%$$

Es necesario destacar que en las fresas N-35-10-15381 y N-35-10-15305 se consigue el mismo aumento de vida al utilizar MQL. Este hecho es debido a que las dos fresas se utilizan para tallar la misma pieza, por lo que deben ser colocadas y retiradas de la talladora a la vez para minimizar el tiempo de cambio de herramienta.



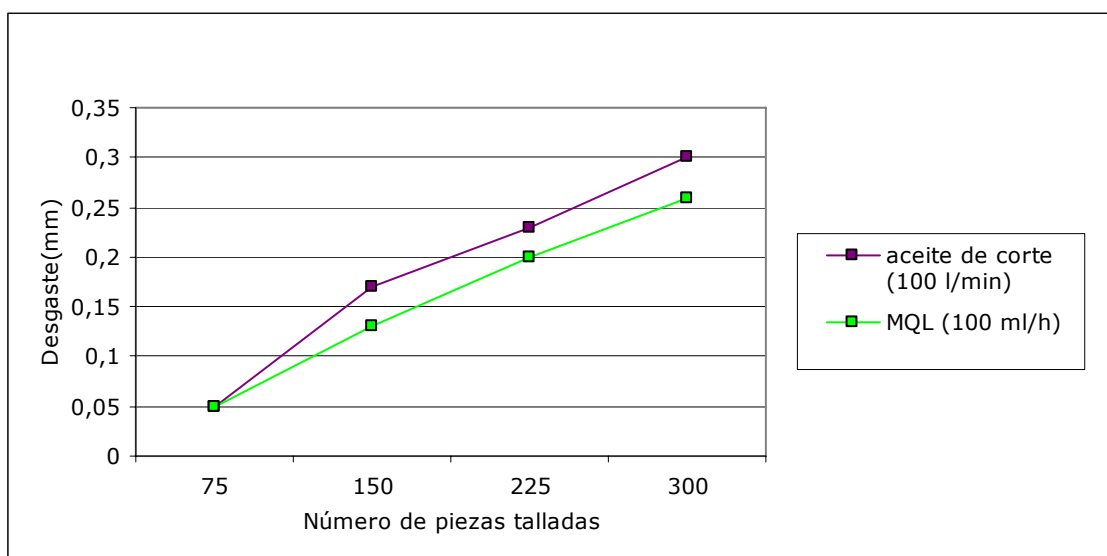
En consecuencia ambas fresas deben realizar el mismo número de piezas entre dosafilados consecutivos y como las dos fresas se afilan 10 veces antes de ser desechadas, a lo largo de su vida útil tallarán el mismo número de piezas.

### 8.3.3 FRESA N-35-10-15444

Con esta fresa, utilizada para el dentado de la pieza CE-20126, se talló un total de 300 unidades con aceite de corte. A continuación, con una fresa similar se tallaron otras 300 piezas con MQL. Para coincidir con la frecuencia del shifting, los desgastes fueron registrados cada 75 piezas. A continuación se muestran cuales fueron los resultados obtenidos:

- **DESGASTES EN LA SUPERFICIE DE INCIDENCIA**

En el siguiente gráfico se compara la evolución del máximo desgaste producido en la superficie de incidencia de los dientes de las fresas al utilizar aceite de corte y MQL.



**Figura 8.30:** Comparación de los desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-10-15444 al utilizar aceite de corte y MQL

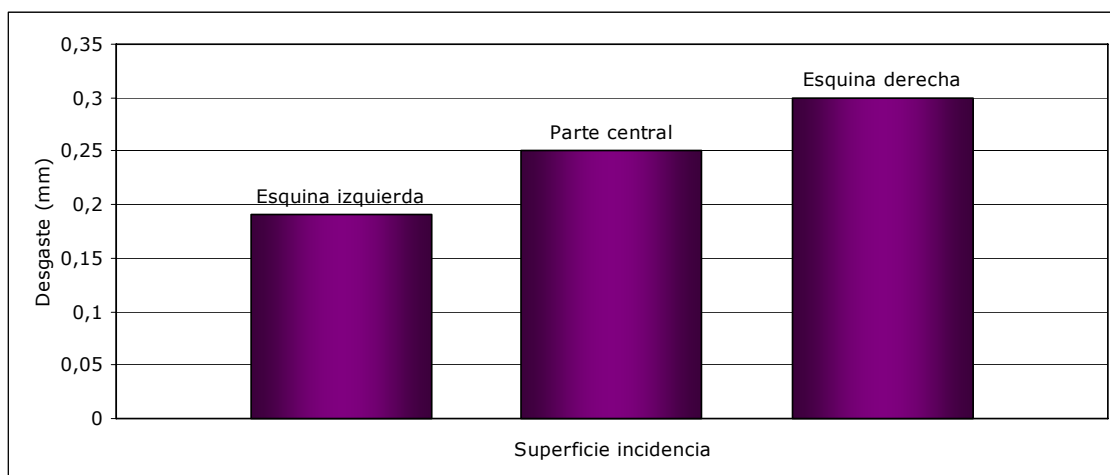
En este gráfico se puede observar como la curva correspondiente al desgaste obtenido con MQL se encuentra siempre por debajo de la curva correspondiente al desgaste obtenido con aceite de corte, aunque en este caso la diferencia es menor que en las anteriores fresas.



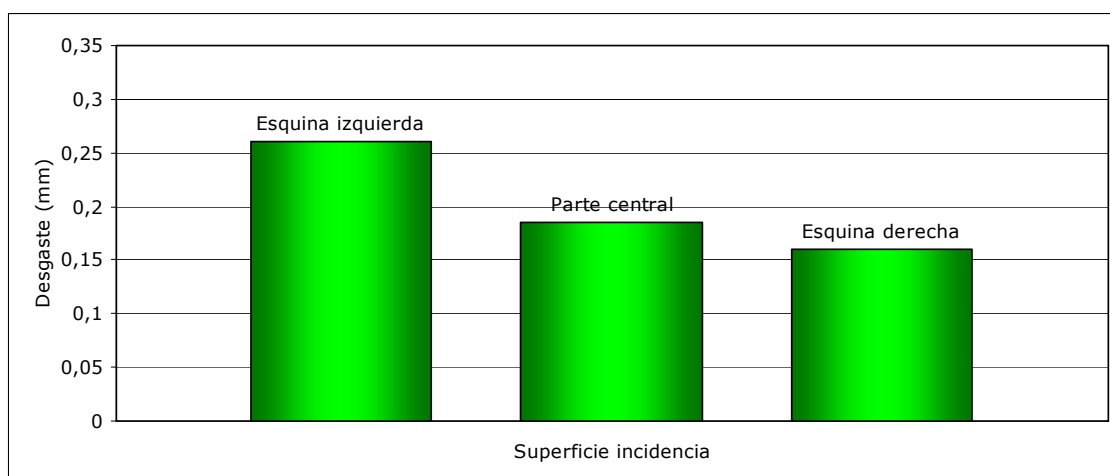
Observando el gráfico con 225 piezas talladas, el máximo desgaste con aceite de corte es 0,23 milímetros, ligeramente superior a los 0,2 milímetros observados con MQL.

Después de tallar 300 piezas el máximo desgaste aparecido con aceite de corte fue de 0,3 milímetros frente a los 0,26 milímetros observados al utilizar MQL.

En los gráficos de las figuras 8.31 y 8.32 se muestra el máximo desgaste aparecido en la superficie de incidencia, tanto en la parte central (cresta del diente) como en las esquinas de los flancos laterales, después de tallar 300 piezas con aceite de corte y con MQL.



**Figura 8.31:** Desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-10-15444 tras tallar 300 piezas con aceite de corte



**Figura 8.32:** Desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-10-15444 tras tallar 300 piezas con MQL

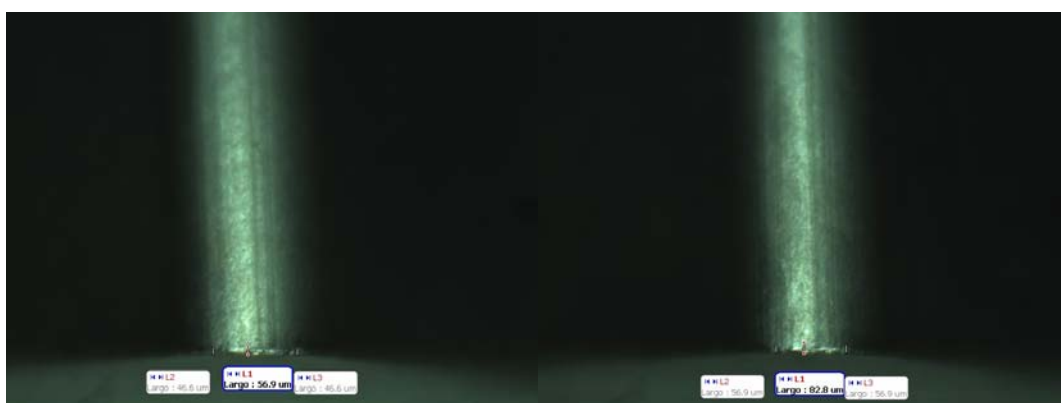


Curiosamente se observa que el máximo desgaste aparecido con aceite de corte se encuentra en la esquina derecha, mientras que el máximo desgaste con MQL apareció en la esquina izquierda. No obstante el desgaste obtenido con aceite de corte es mayor que el desgaste obtenido con MQL.

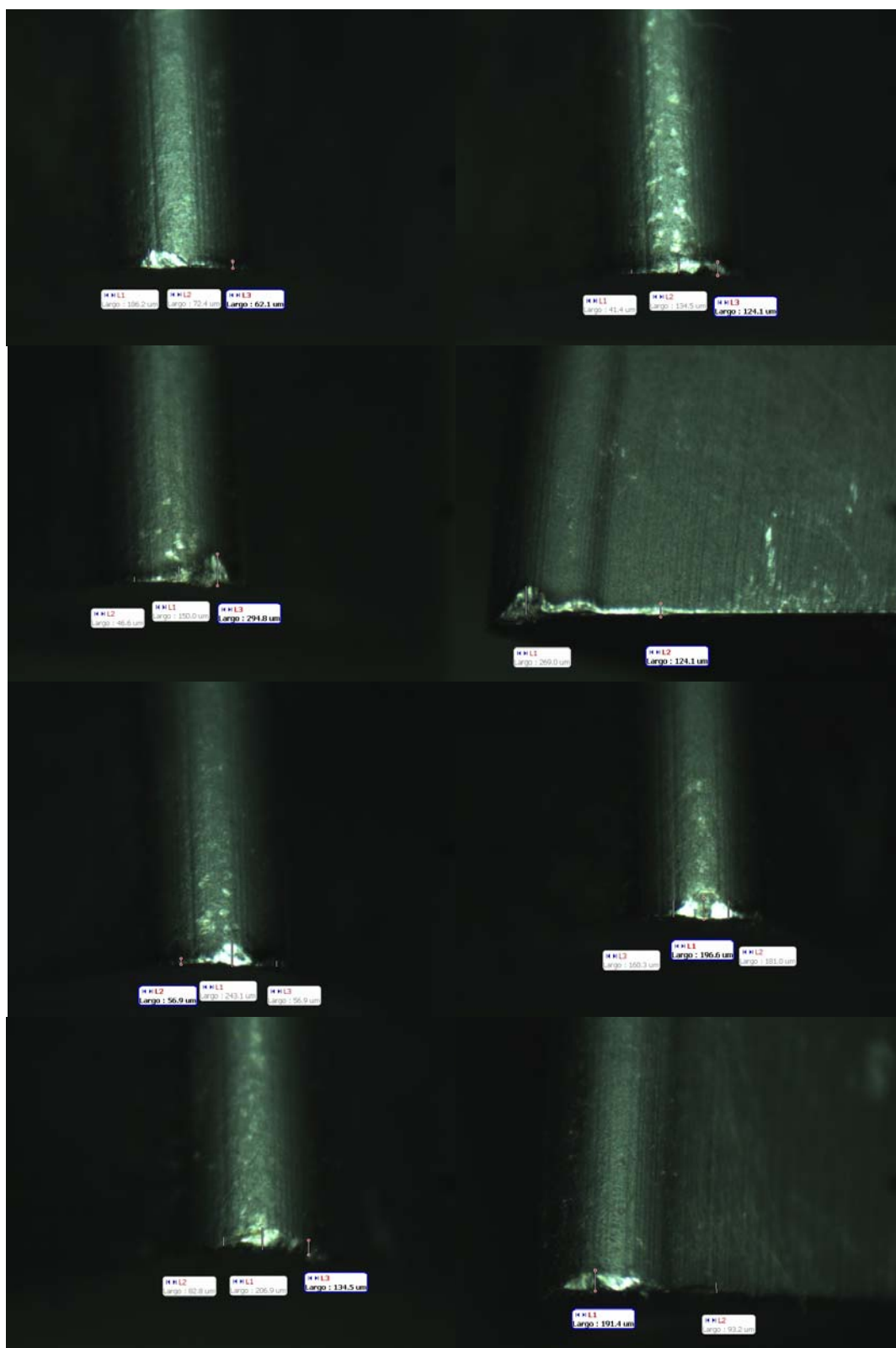
A continuación se muestran algunas imágenes de los desgastes producidos en la superficie de incidencia de distintos dientes, después de haber tallado 300 piezas con aceite de corte y con MQL. En ellas se observa como algunos dientes han comenzado a mellarse.



**Figura 8.33:** Imágenes de la zona central de la superficie de incidencia de dos dientes que presentaban desgaste abrasivo tras tallar 300 piezas con aceite de corte

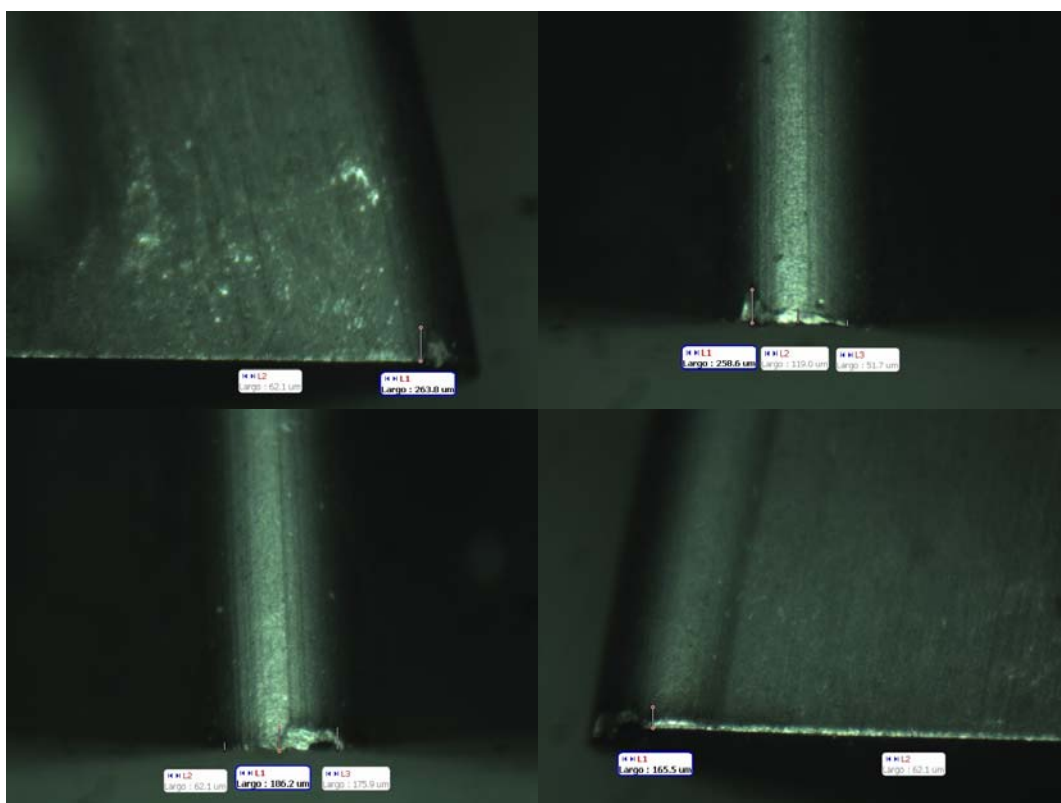


**Figura 8.34:** Imágenes de la zona central de la superficie de incidencia de dos dientes que presentaban desgaste abrasivo tras tallar 300 piezas con MQL



**Figura 8.35:** Imágenes de la zona central y de esquina de la superficie de incidencia de los dientes que presentaban mayores mellados tras tallar 300 piezas con aceite de corte





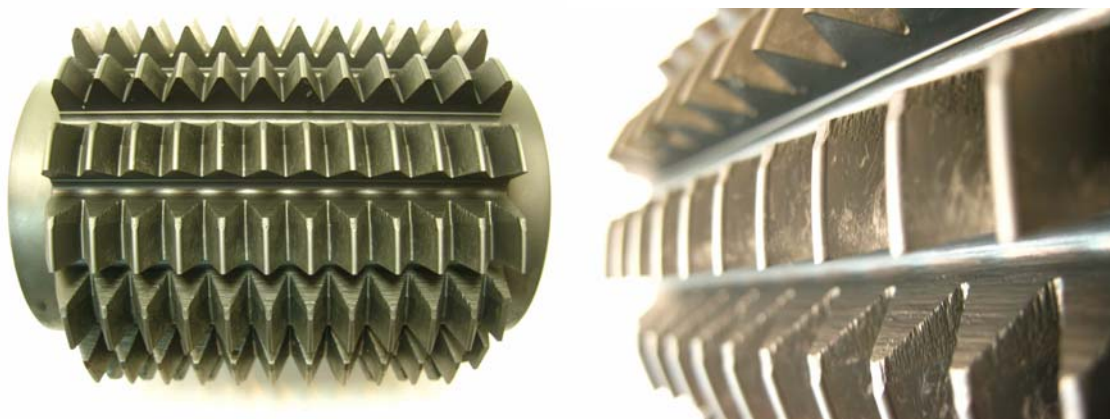
**Figura 8.36:** Imágenes de la zona central y de esquina de la superficie de incidencia de los dos dientes que presentaban mayores mellados tras tallar 300 piezas con MQL

En estas imágenes, se puede observar que tanto el desgaste abrasivo como el tamaño de las mellas aparecidas en los dientes de las fresas, son notablemente inferiores en caso de utilizar MQL.

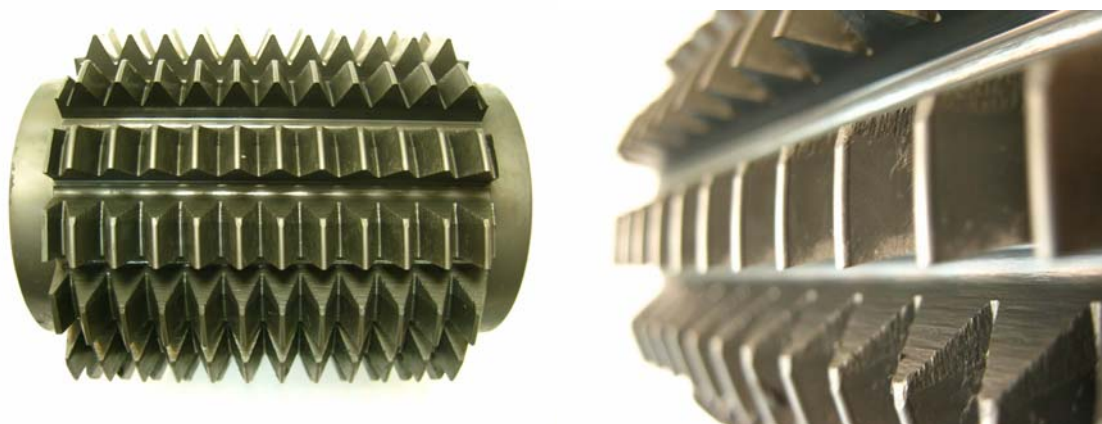
Además se observó que al utilizar aceite de corte, el número de dientes en los que apareció algún mellado era mucho mayor que al utilizar MQL.

Por lo tanto, también con este modelo de fresa queda comprobado que el sistema MQL disminuye los desgastes producidos en la superficie de incidencia.

En las figuras 8.37 y 8.38 se muestran imágenes de las dos fresas después de tallar 300 piezas con aceite de corte y con MQL respectivamente. En ellas se puede apreciar como la fresa que talló con aceite de corte presenta mayores abrasiones en los flancos de los dientes que la que talló con MQL.



**Figura 8.37:** Imágenes de la fresa N-35-10-15444 tras tallar 300 piezas con aceite de corte



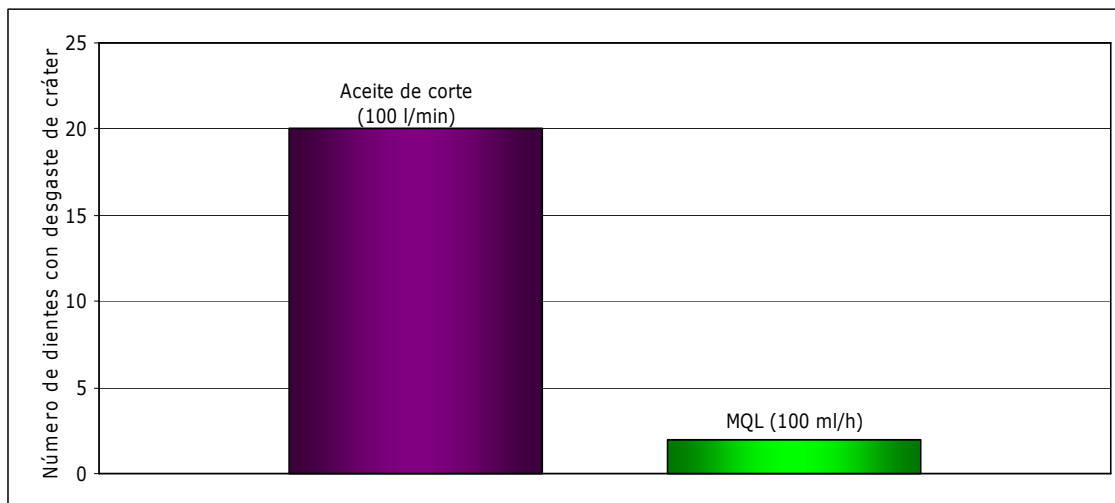
**Figura 8.38:** Imágenes de la fresa N-35-10-15444 tras tallar 300 piezas con MQL

- **DESGASTES EN LA CARA DE CORTE**

Después de haber tallado 300 piezas, la fresa que trabajó con aceite de corte presentaba desgaste tipo cráter en diversos dientes, mientras que en la fresa que talló con MQL tan sólo dos dientes presentaban desgaste en su cara de corte.

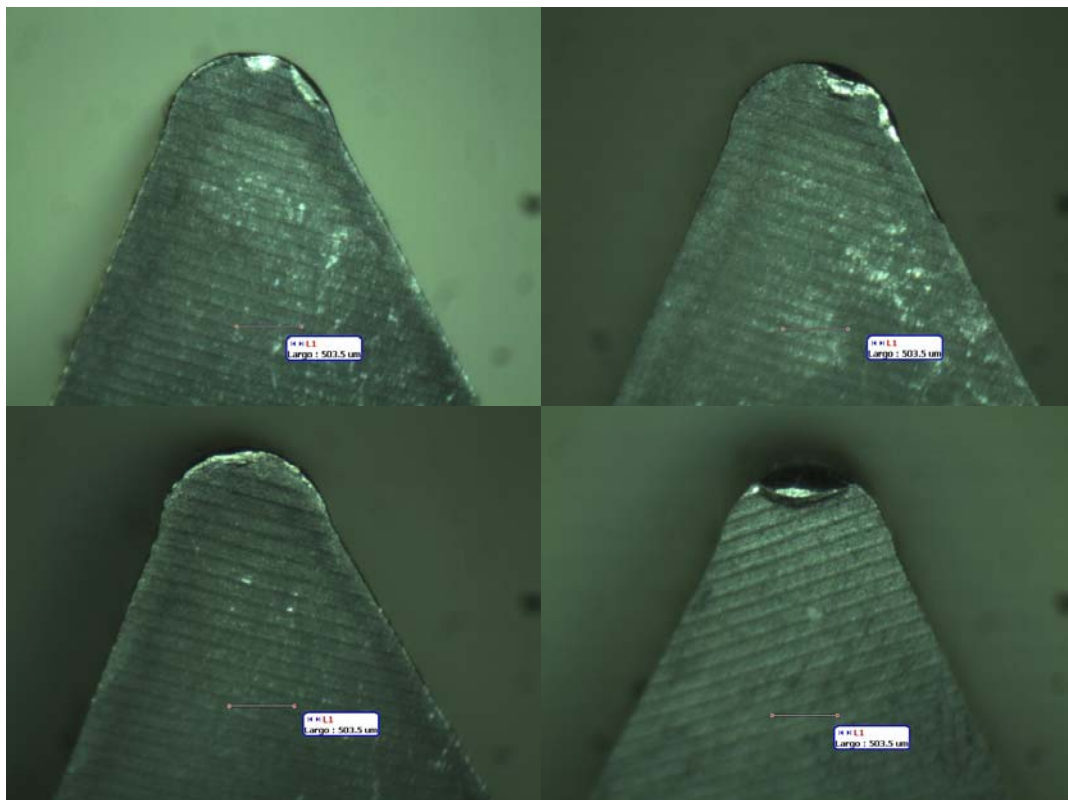
Además, los desgastes observados al tallar con MQL estaban relacionados con la aparición de algún mellado, sin que llegara a apreciarse ningún cráter completamente formado.

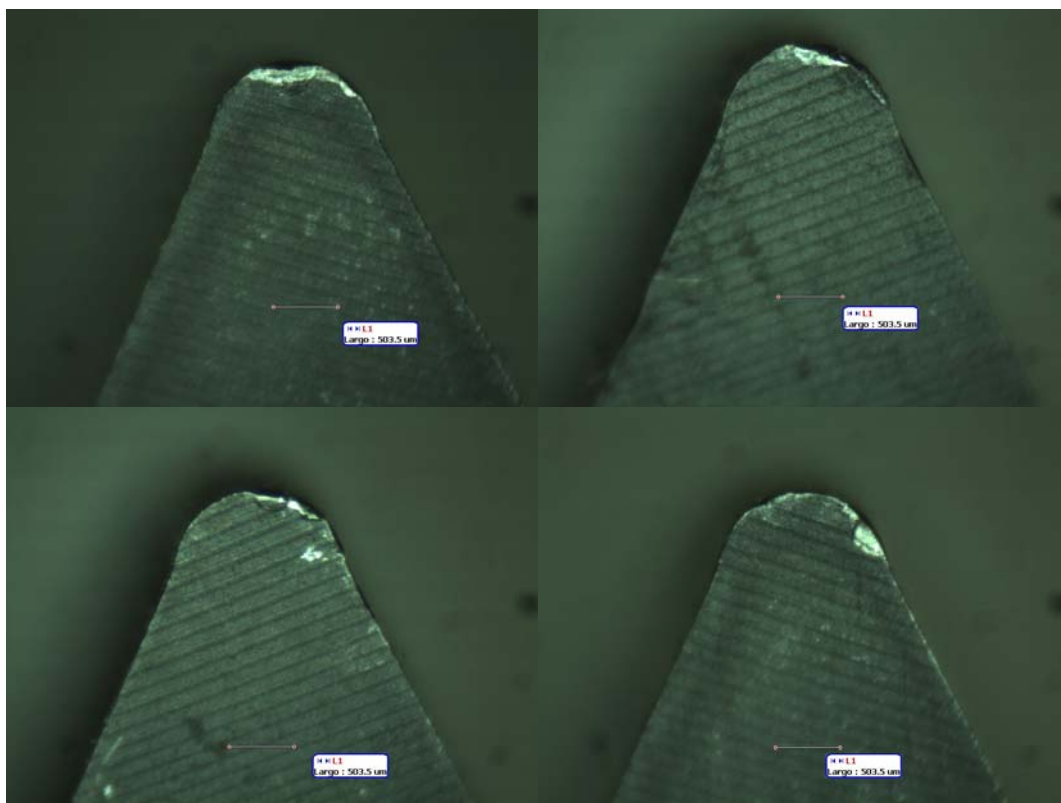
En el siguiente gráfico se muestra una representación del número de dientes en los que apareció desgaste tipo cráter después de tallar 300 piezas con aceite de corte y con MQL.



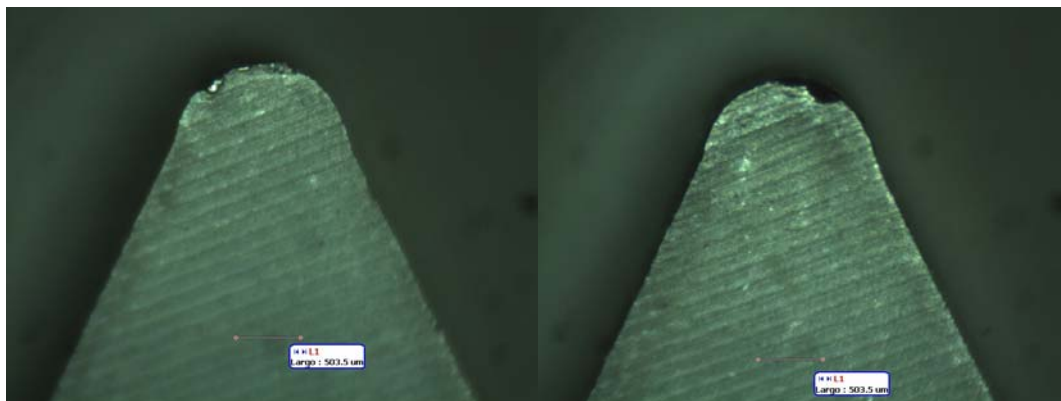
**Figura 8.39:** Comparación del número de dientes de cada fresa con desgaste de cráter tras tallar 300 piezas con aceite de corte y con MQL

En las siguientes figuras, se pueden observar los desgastes aparecidos en la cara de corte de diversos dientes después de haber tallado 300 piezas con aceite de corte y con MQL. En ellas se aprecia como los desgastes producidos en la cara de corte son mucho mayores en el caso de utilizar aceite de corte.





**Figura 8.40:** Imágenes de algunos de los numerosos dientes afectados con desgaste de cráter tras tallar 300 piezas con aceite de corte



**Figura 8.41:** Imágenes de los dos únicos dientes en los que se observaron desgastes en la cara de corte tras tallar 300 piezas con MQL

Por lo tanto el sistema MQL también tiene efectos positivos sobre el desgaste producido en la cara de corte de los dientes de esta fresa.



- **AUMENTO EN LA VIDA DE LA FRESA N-35-10-15444**

La frecuencia habitual de afilado de esta fresa al utilizar aceite de corte es de 3 shiftings, es decir, 225 piezas. Al igual que en las anteriores fresas, esta frecuencia está basada en la experiencia de los preparadores e ingenieros de producción.

Sin embargo, a partir de los resultados obtenidos en los desgastes de la misma fresa al trabajar con MQL, se llegó a la conclusión de que con este sistema de lubricación es posible realizar el afilado cada 4 shiftings (300 piezas) sin que exista peligro de rotura de sus dientes. Esta decisión fue consensuada por preparadores e ingenieros de producción.

El afilado de esta fresa madre se realiza de forma similar a las anteriores, eliminando una longitud de 0,455 milímetros en cada diente (siempre y cuando el máximo desgaste no supere dicha longitud), realizando un total de 10 afilados antes de que la fresa sea desechada.

Al utilizar aceite de corte, de acuerdo con la Figura 8.30 el máximo desgaste aparecido después de tallar 225 piezas es 0,23 milímetros, inferior a 0,455 milímetros. Como se tallan 225 piezas entre dos afilados, la fresa madre tiene una vida de 2475 piezas al tallar con aceite de corte.

$$225 \text{ piezas} + 10 \text{ afilados} \cdot 225 \text{ piezas} / \text{afilado} = 2475 \text{ piezas}$$

Al utilizar MQL, después de haber tallado 300 piezas el máximo desgaste que aparece es de 0,26 milímetros, también inferior a los 0,455 milímetros que se eliminan durante el afilado. De esta manera, si entre dos afilados se tallan 300 piezas, la vida de esta fresa madre al tallar con MQL es de 3300 piezas.

$$300 \text{ piezas} + 10 \text{ afilados} \cdot 300 \text{ piezas} / \text{afilado} = 3300 \text{ piezas}$$

Se obtendría así un aumento en la vida de esta fresa madre de un 33%.

$$\frac{3300 \text{ piezas}}{2475 \text{ piezas}} \cdot 100 = 133\%$$



Tanto al utilizar aceite de corte como al utilizar MQL, los máximos desgastes producidos en la superficie de incidencia de los dientes, presentaban unas dimensiones comprendidas entre 0,2 y 0,3 milímetros en el instante en que fueron enviadas a afilar.

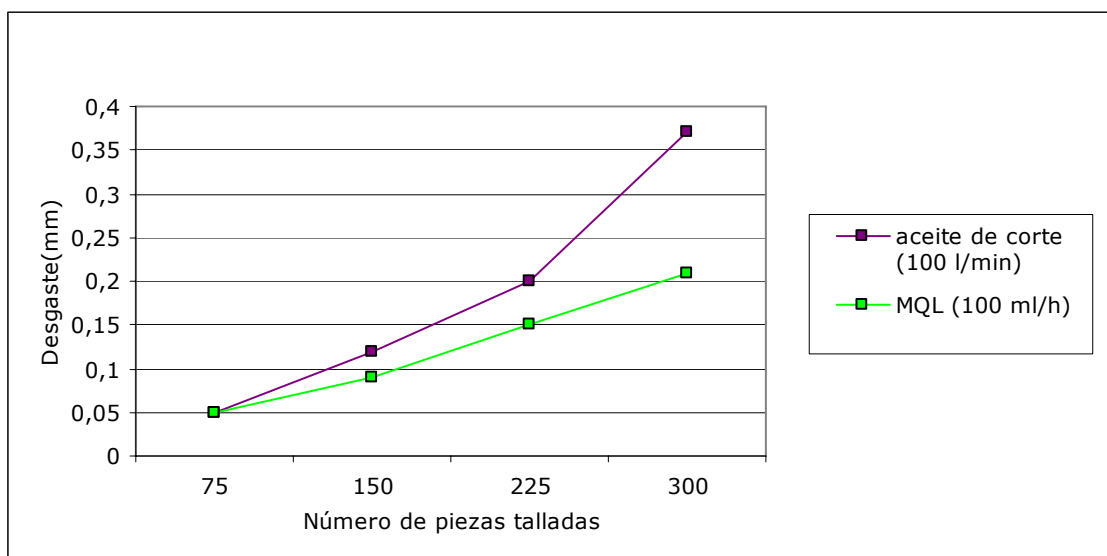
Estos resultados también se corresponden con el desgaste admisible mostrado en la Figura 4.22 perteneciente al Capítulo 4 (Tallado de engranajes)

### 8.3.4 FRESA N-35-11-15333

Este modelo de fresa se utiliza en el estriado de la pieza CE-20126, por lo que al igual que en el caso anterior se talló un total de 300 unidades con aceite de corte y otras 300 con MQL. Los desgastes se registraron cada 75 piezas por ser la frecuencia con que se completaba el shifting. A continuación se muestran cuales fueron los resultados obtenidos:

- **DESGASTES EN LA SUPERFICIE DE INCIDENCIA**

En el siguiente gráfico se compara la evolución del máximo desgaste producido en la superficie de incidencia de los dientes de cada una de las fresas, al utilizar aceite de corte y MQL.



**Figura 8.42:** Comparación de los desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-11-15333 al utilizar aceite de corte y MQL



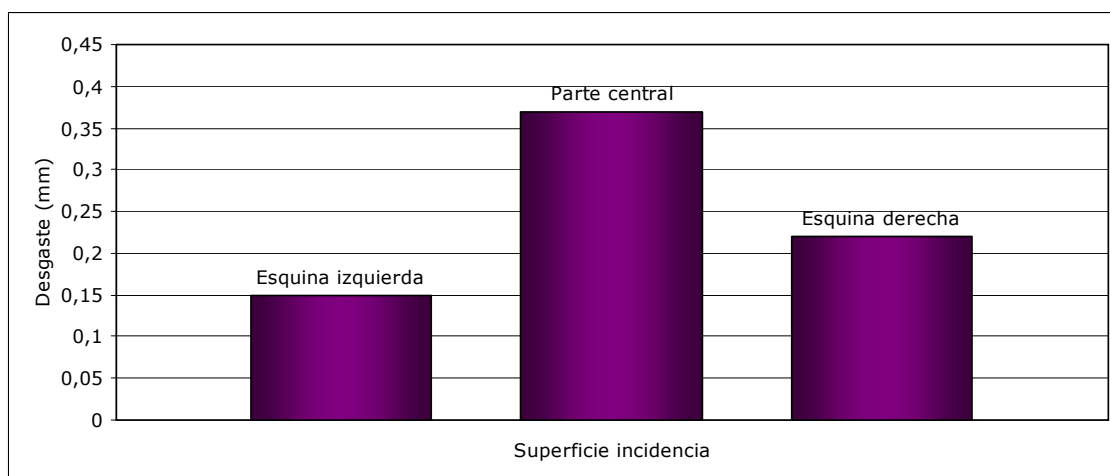


En el gráfico se aprecia claramente como el desgaste producido cuando se utiliza aceite de corte es muy superior al desgaste producido cuando se utiliza MQL. Además, esta diferencia aumenta notablemente a medida que se talla mayor número de piezas.

Esta fresa se afila habitualmente cada 225 piezas. Observando el gráfico en este número de piezas talladas, el máximo desgaste obtenido con aceite de corte es de 0,2 milímetros, mientras que con MQL el máximo desgaste es de 0,15 milímetros.

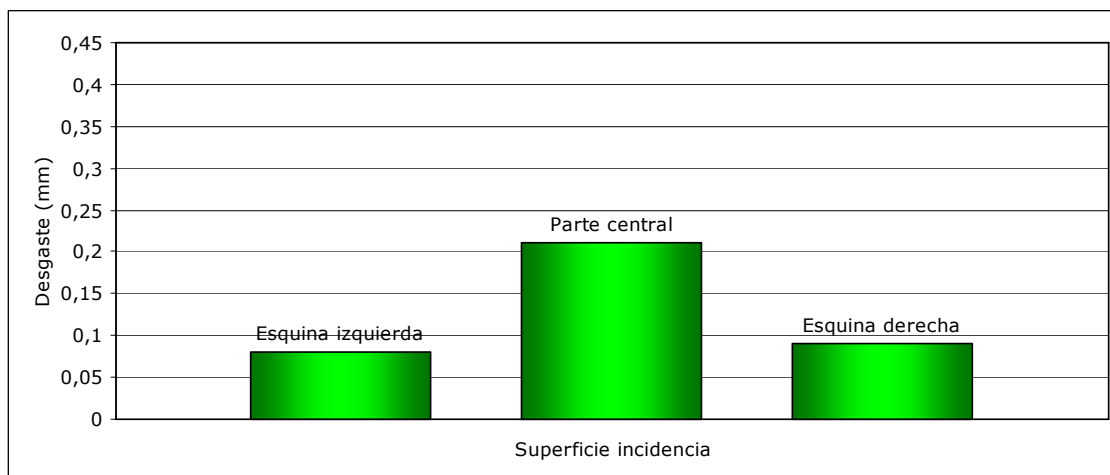
Sin embargo, después de tallar 300 piezas con aceite de corte el desgaste aumenta hasta 0,37 milímetros. En cambio utilizando el sistema MQL, el máximo desgaste es de 0,21 milímetros.

En las figuras 8.43 y 8.44 se muestra el desgaste máximo obtenido en la superficie de incidencia, tanto en la parte central como en las esquinas de los flancos laterales, después de tallar 300 piezas con aceite de corte y con MQL.



**Figura 8.43:** Desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-11-15333 tras tallar 300 piezas con aceite de corte

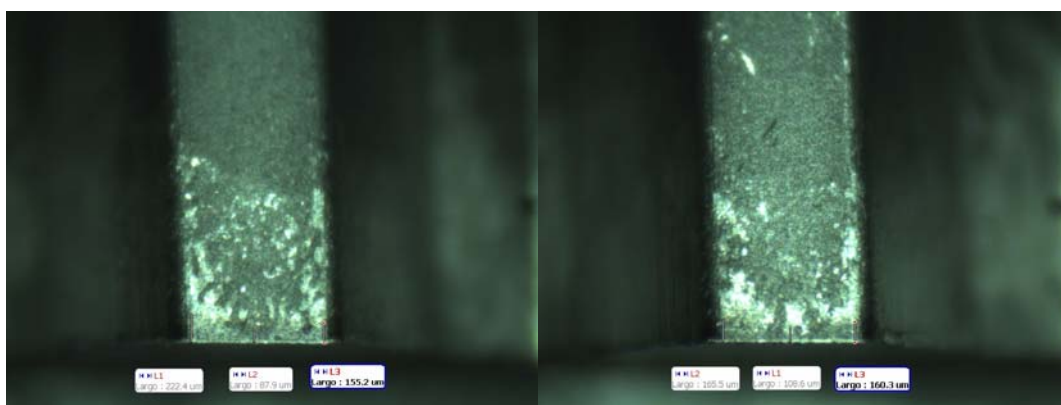




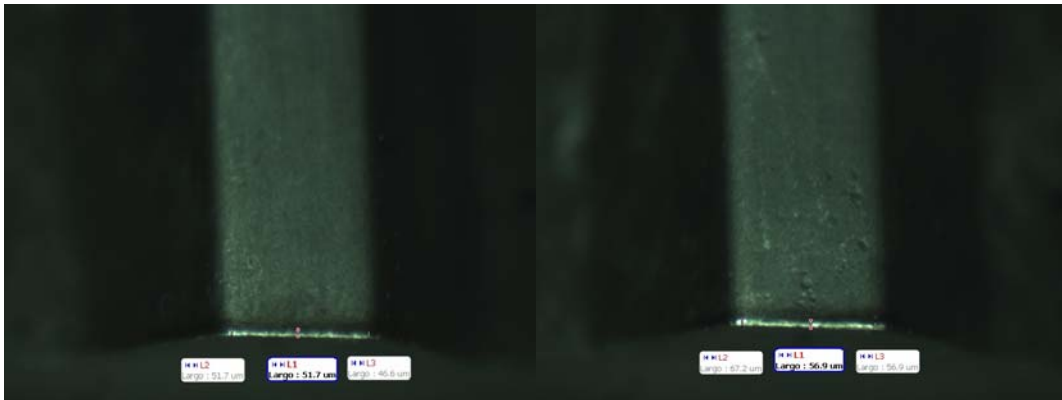
**Figura 8.44:** Desgastes obtenidos en la superficie de incidencia de los dientes de la fresa N-35-11-15333 tras tallar 300 piezas con MQL

Se puede observar como el máximo desgaste en este tipo de fresa se obtiene en la parte central de la superficie de incidencia, siendo mucho mayor en el caso de utilizar aceite de corte que en el caso de utilizar MQL.

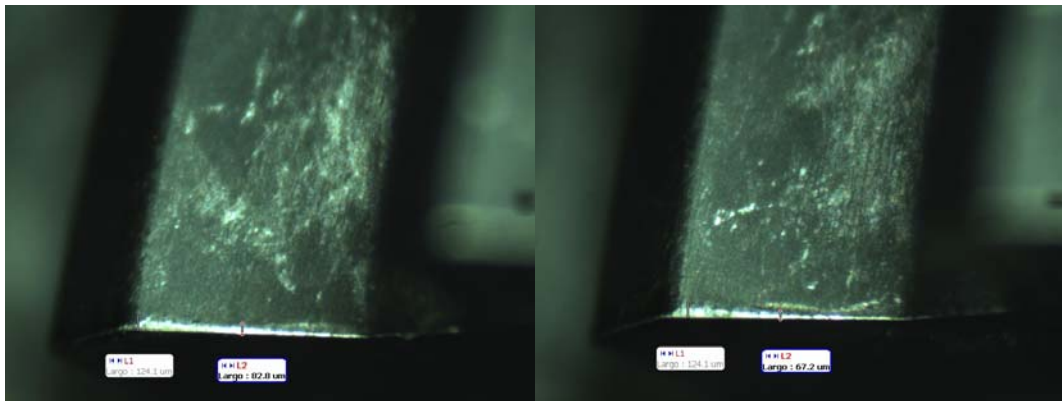
A continuación se muestran algunas imágenes de desgastes tipo abrasivo producidos en la zona central de la superficie de incidencia y en los flancos laterales de distintos dientes, después de haber tallado 300 piezas con aceite de corte y con MQL.



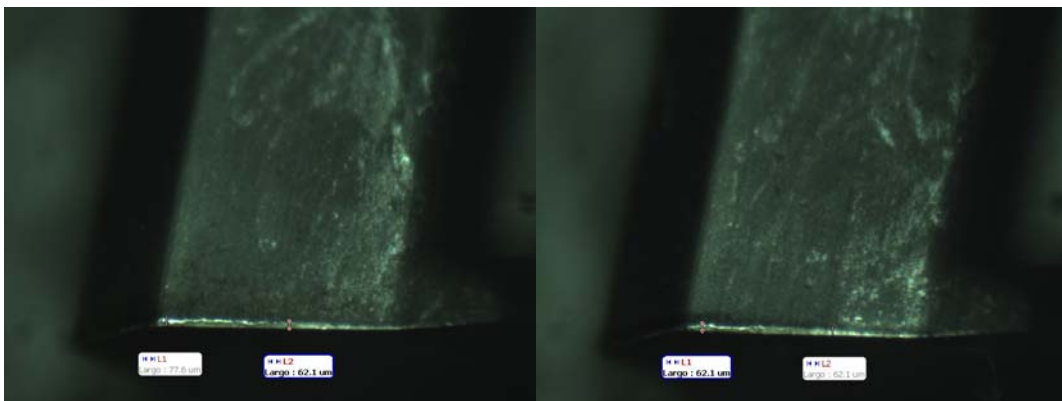
**Figura 8.45:** Imágenes de la superficie de incidencia de dos dientes que presentaban desgaste abrasivo tras haber tallado 300 piezas con aceite de corte



**Figura 8.46:** Imágenes de la superficie de incidencia de dos dientes que presentaban desgaste abrasivo tras haber tallado 300 piezas con MQL



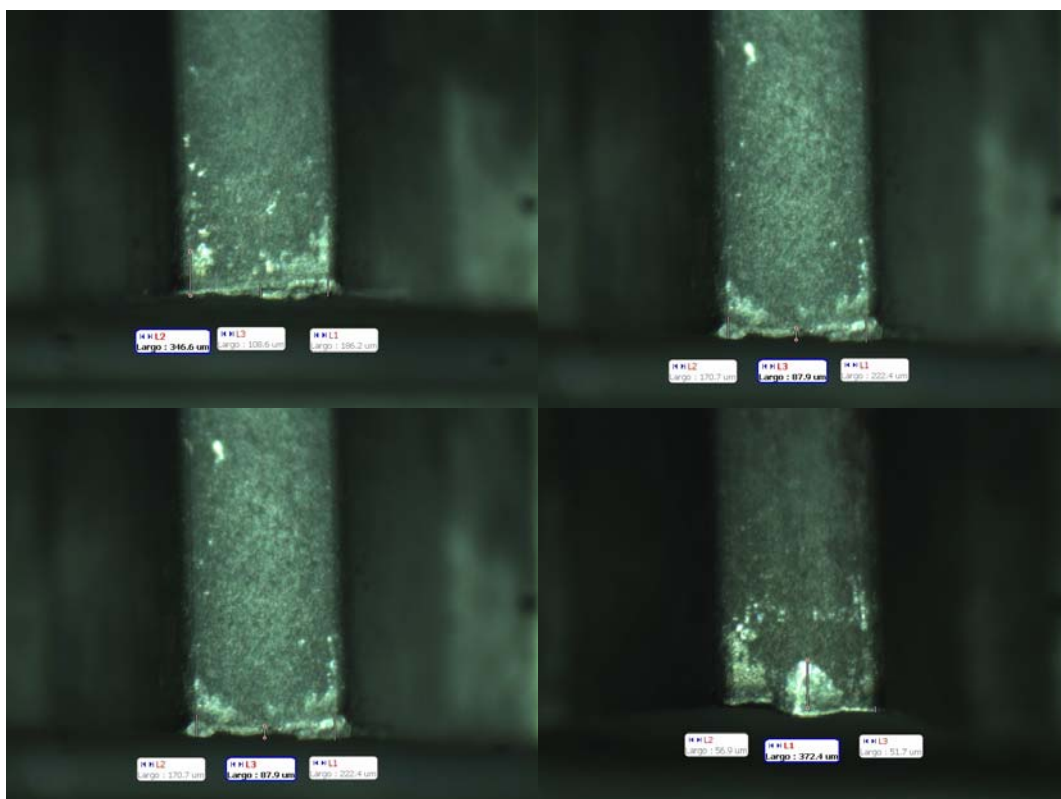
**Figura 8.47:** Imágenes del flanco lateral derecho de dos dientes que presentaban desgaste abrasivo tras haber tallado 300 piezas con aceite de corte



**Figura 8.48:** Imágenes del flanco lateral derecho de dos dientes que presentaban desgaste abrasivo tras haber tallado 300 piezas con MQL

En estas imágenes se observa claramente como al utilizar aceite de corte, el desgaste abrasivo es mucho mayor que al utilizar MQL. Este efecto se aprecia tanto en la superficie de incidencia como en los flancos laterales de los dientes.

A continuación se muestran los mellados más importantes que aparecieron al utilizar aceite de corte y al utilizar MQL.



**Figura 8.49:** Imágenes de la superficie de incidencia de los cuatro dientes que presentaban mayores mellados después de tallar 300 piezas con aceite de corte



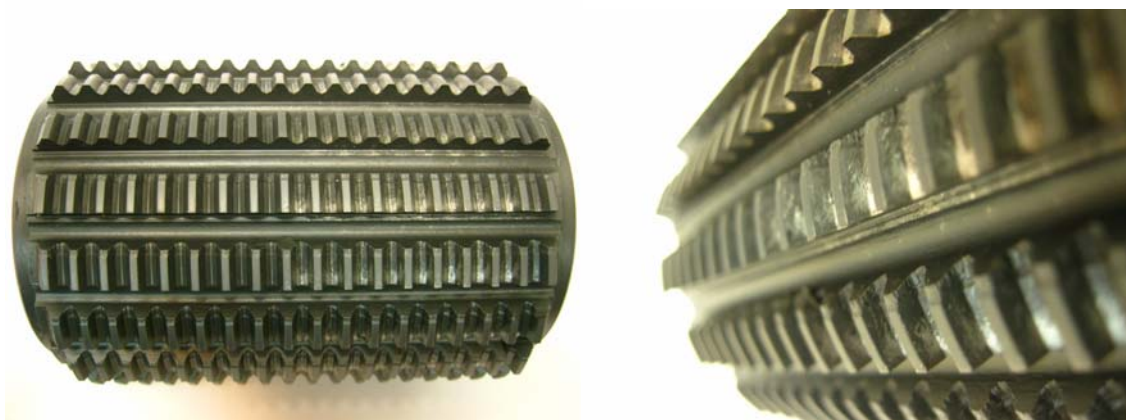
**Figura 8.50:** Imágenes de la superficie de incidencia de los dos dientes que presentaban mayores mellados después de tallar 300 piezas con MQL



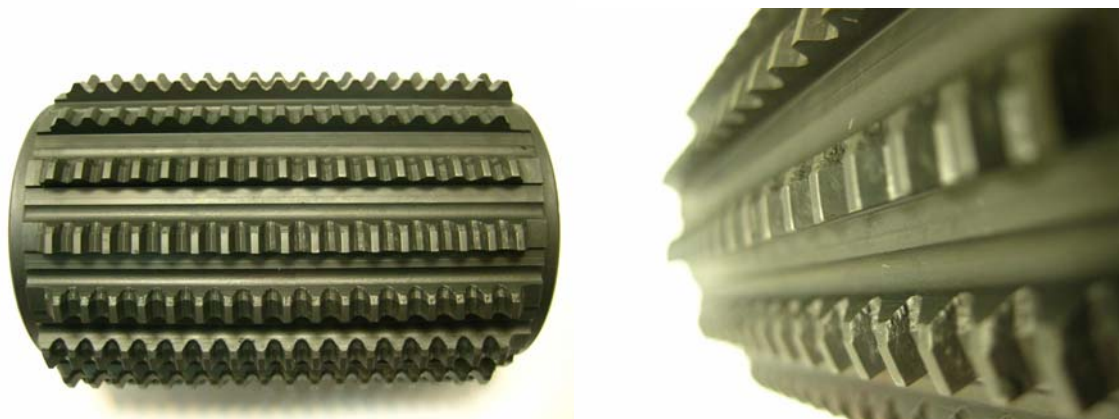
En las imágenes anteriores se puede observar como la máxima mella aparecida al utilizar aceite de corte es más grande que la mella de mayor tamaño aparecida al utilizar MQL.

En las figuras 8.51 y 8.52 se muestran las dos fresas después de haber tallado 300 piezas con aceite de corte y con MQL respectivamente. En ellas se puede observar como el recubrimiento de la fresa que trabajó con aceite de corte presenta mayores abrasiones que el de la fresa que trabajó con MQL.

Estas abrasiones no afectan únicamente a la superficie de incidencia de los dientes, sino que también los flancos laterales e incluso los valles entre dientes de la fresa que talló con aceite de corte están mucho más dañados que esas zonas de la fresa que talló con MQL.



**Figura 8.51:** Imágenes de la fresa N-35-11-15333 después de tallar 300 piezas con aceite de corte



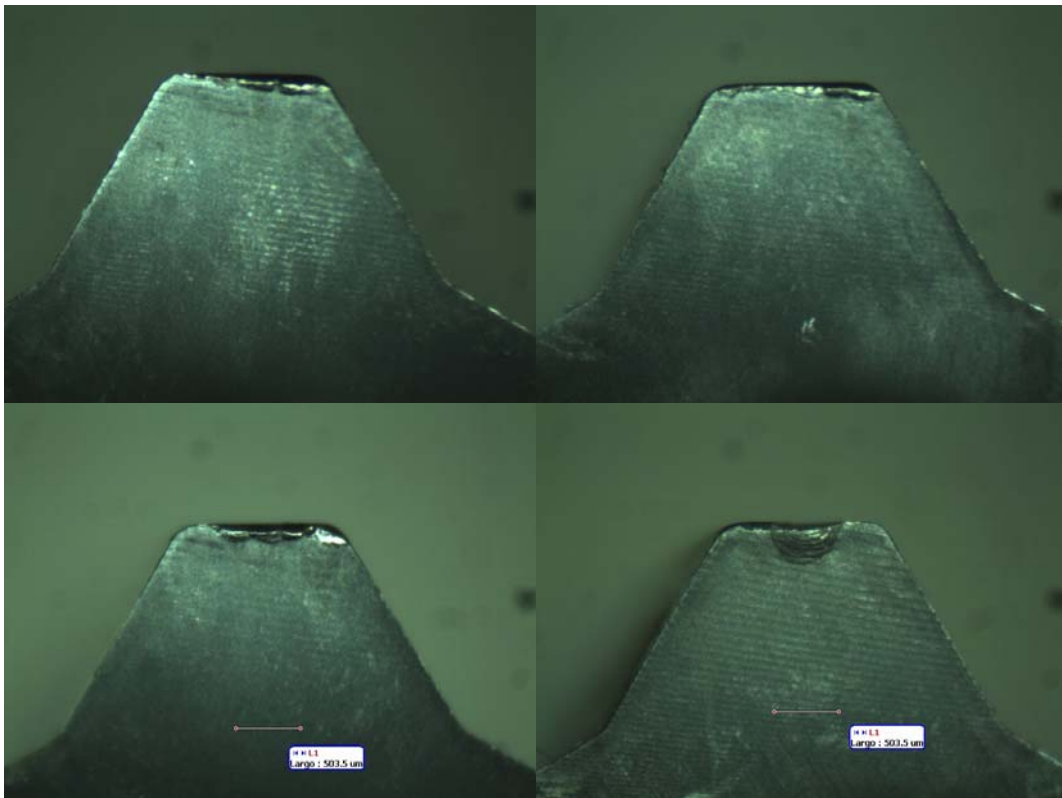
**Figura 8.52:** Imágenes de la fresa N-35-11-15333 después de tallar 300 piezas con MQL

Todas estas abrasiones son producidas por la viruta desprendida, que en el caso de utilizar aceite de corte queda atrapada entre los dientes de pequeño tamaño de esta fresa. En cambio al utilizar el sistema MQL, la mezcla aire-aceite facilita la evacuación de esta viruta reduciendo dichas abrasiones.

- **DESGASTES EN LA CARA DE CORTE**

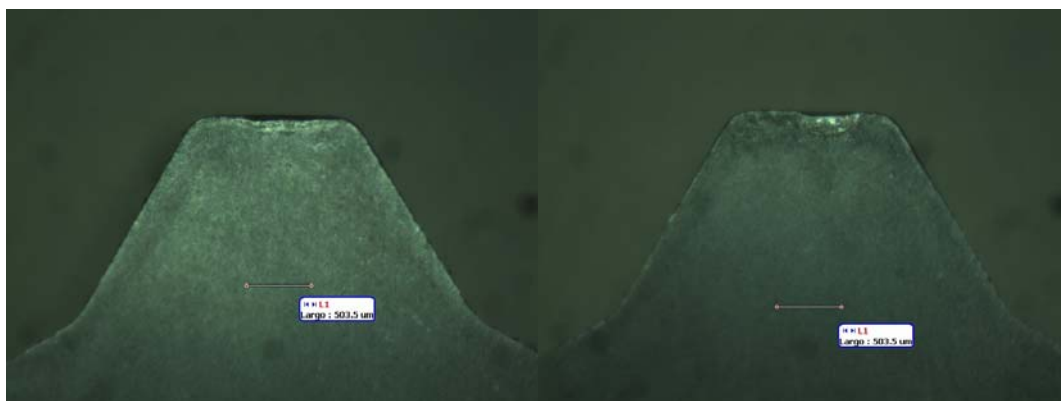
En este tipo de fresa madre, el desgaste tipo cráter no aparece de manera clara. Únicamente se aprecia algún desgaste en la cara de corte de los dientes que presentan algún mellado.

En las siguientes imágenes se muestran los mayores desgastes observados en la cara de corte de los dientes que trabajaron con aceite de corte y con MQL. En ellas se observa que pese a no aparecer ningún cráter, los dientes que tallaron con aceite de corte están mucho más dañados que los que tallaron con MQL.



**Figura 8.53:** Imágenes de la cara de corte de los cuatro dientes que presentaban mayor desgaste después de tallar 300 piezas con aceite de corte





**Figura 8.54:** Imágenes de la cara de corte de los dos únicos dientes que presentaban desgaste después de tallar 300 piezas con MQL

El hecho de que ningún diente presente cráter completamente formado se debe a que esta fresa se utiliza para tallar un estriado fino, por lo que el tamaño de la viruta arrancada es muy pequeño.

- **AUMENTO EN LA VIDA DE LA FRESA N-35-11-15333**

De igual modo que en el caso anterior, al utilizar aceite de corte la frecuencia habitual de afilado de esta fresa es de 3 shiftings, es decir, 225 piezas.

Sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos en los desgastes de la misma fresa al trabajar con MQL, se llegó a la conclusión de que con este sistema de lubricación es posible realizar el afilado cada 4 shiftings (300 piezas) sin que exista peligro de rotura de sus dientes.

El afilado de esta fresa se realiza de forma similar a los anteriores casos, eliminando una longitud de 0,455 milímetros de cada diente, y realizando un total de 10 afilados antes de que la fresa sea desechada.

Al utilizar aceite de corte, de acuerdo con la figura 8.42 el máximo desgaste aparecido después de tallar 225 piezas es 0,2 milímetros, inferior a 0,455 milímetros.

Como se tallan 225 piezas entre dos afilados, la fresa madre tiene una vida de 2475 piezas al tallar con aceite de corte.



$$225 \text{ piezas} + 10 \text{afilados} \cdot 225 \text{ piezas} / \text{afilado} = 2475 \text{ piezas}$$

Al utilizar MQL, después de haber tallado 300 piezas el máximo desgaste que aparece es de 0,21 milímetros, también inferior a los 0,455 milímetros que se eliminan durante el afilado.

De esta manera, la vida de esta fresa madre al tallar con MQL es de 3300 piezas.

$$300 \text{ piezas} + 10 \text{afilados} \cdot 300 \text{ piezas} / \text{afilado} = 3300 \text{ piezas}$$

Se obtendría así un aumento en la vida de esta fresa madre de un 33%.

$$\frac{3300 \text{ piezas}}{2475 \text{ piezas}} \cdot 100 = 133\%$$

Los resultados del aumento en la vida de esta fresa madre son similares a los obtenidos en la fresa N-35-10-15444, ya que estas dos fresas se utilizan para tallar la pieza CE-20126, por lo que deben colocarse y retirarse a la vez de la talladora. Como realizan el mismo número de piezas entre dos afilados y ambas fresas se afilan 10 veces antes de ser desechadas, la vida de estas dos fresas debe ser la misma.





### 8.4 CONCLUSIONES

En este capítulo se resumen los resultados obtenidos en las pruebas que se llevaron a cabo, con el objetivo comprobar la eficacia del sistema MQL en el proceso de tallado por generación.

En primer lugar se muestran los resultados de las temperaturas alcanzadas en las piezas al finalizar el ciclo de tallado. Pese a que las temperaturas registradas después de tallar con MQL fueron ligeramente superiores a las temperaturas alcanzadas al tallar con aceite de corte, se comprobó que las piezas no sufrían dilataciones térmicas apreciables, por lo que dimensionalmente eran válidas para producción.

A continuación se muestran a modo de ejemplo los gráficos de tallado utilizados en John Deere Ibérica S.A. para comprobar que los engranajes cumplen con los criterios de calidad requeridos.

Con este fin, los ejes tallados con MQL fueron sometidos a un proceso de rodadura con patrón, sin que los técnicos del Departamento de Calidad observasen diferencia alguna respecto a las piezas que fueron talladas con aceite de corte. De esta manera se comprobó que el sistema MQL era válido para producción.

El siguiente paso fue comprobar el efecto que este nuevo sistema de lubricación tenía en el desgaste de las fresas madre, estudio en el que se centra el presente capítulo. Para ello se realizaron numerosas pruebas con 4 modelos de fresas madre diferentes, utilizadas para tallar dos piezas distintas.

En estas pruebas se comprobó que al tallar con MQL el desgaste producido en las fresas es menor que al tallar con aceite de corte. Este efecto apareció tanto en la superficie de incidencia como en la cara de corte de los dientes de todas las fresas analizadas.

En las figuras 8.4, 8.17, 8.30 y 8.42 se muestra la evolución de los desgastes de la superficie de incidencia de las fresas analizadas con el número de piezas talladas. En estas figuras se puede observar como en las cuatro fresas analizadas, al utilizar MQL siempre se produce menor desgaste que al utilizar aceite de corte.



En dichas figuras se puede observar que al tallar con el sistema MQL, en ningún momento se superaron los 0,3 milímetros de desgaste en la superficie de incidencia, lo que corresponde con la longitud crítica en fresas madre recubiertas tal y como se explicó en el Capítulo 4.

En las fresas N-35-10-15381 y N-35-10-15305, utilizadas para tallar el dentado y el estriado de la pieza CE-18223, se obtuvieron los mejores resultados. Con ambas fresas fue posible tallar 350 piezas con MQL sin que los dientes presentasen desgastes importantes. En cambio al utilizar aceite de corte tan solo fue posible tallar 280 piezas, resultando las fresas seriamente dañadas.

En las fresas N-35-10-15444 y N-35-11-15333, utilizadas para tallar el dentado y el estriado de la pieza CE-20126, también se obtuvieron resultados positivos. Aunque con los dos sistemas de lubricación se tallaron 300 piezas, el desgaste que sufrieron estas dos fresas con aceite de corte fue notablemente mayor que cuando se talló con MQL.

De esta manera, gracias a la experiencia de los preparadores e ingenieros junto a los que se trabajó, fue posible realizar una estimación del aumento de vida de estas fresas al utilizar el sistema MQL. Los resultados se muestran en el siguiente cuadro resumen:

	Vida de la herramienta con aceite de corte	Vida de la herramienta con MQL	Aumento en la vida de la herramienta
N-35-10-15381 y N-35-10-15305	2310	3850	67%
N-35-10-15444 y N-35-11-15333	2475	3300	33%

**Tabla 8.2:** Resumen del aumento de vida alcanzado en las fresas madre

Estos aumentos en la vida de las fresas se consiguen tallando mayor número de piezas entre dos afilados consecutivos. Esto es posible gracias al menor desgaste observado al tallar con MQL.

No obstante, aunque únicamente se analizó el desgaste de estos 4 modelos de fresas, el sistema MQL trabajó con el resto de fresas que se utilizan en la talladora, sin que se observase ningún efecto anómalo al tallar las correspondientes piezas.



## *CAPÍTULO 9:*

# *ESTUDIO ECONÓMICO Y CONCLUSIONES*



## 9. ESTUDIO ECONÓMICO Y CONCLUSIONES

### 9.1 ESTUDIO ECONÓMICO

En este capítulo se recogen los principales resultados económicos del presente proyecto.

En primer lugar se muestran cuales fueron los costes de inversión, a continuación se calculan cuales son los ahorros obtenidos, así como el período de amortización.

Por último se estiman los ahorros que se podrían obtener en caso de que se realizase una ampliación de este proyecto.

#### 9.1.1 COSTES DE INVERSIÓN

Dentro de los costes de inversión se incluye tanto el coste de los diferentes dispositivos que fueron instalados en la talladora, como el coste de la mano de obra necesaria para su instalación.

##### DISPOSITIVOS INSTALADOS EN LA TALLADORA

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PRECIO	COSTE TOTAL
Filtro Donaldson Dryflo DMC-MMC	1	4.487 €	4.487 €
Sistema MQL Lubrilean Basic con 4 salidas	1	2.190 €	2.190 €
Soporte filtro	1	450 €	450 €
Protección seguridad	1	300 €	300 €
Manguera coaxial 4 metros y tobera de proyección	4	147 €	588 €
Soporte toberas	1	30 €	30 €
Rótula	4	5 €	20 €
Selector 2 posiciones Telemecanique ZB4-BD2	1	6 €	6 €
Contactador N/A Telemecanique ZBE-101	1	3 €	3 €
<b>TOTAL</b>			<b>8.074 €</b>

**Tabla 9.1:** Costes de los dispositivos instalados en la talladora

MANO DE OBRA

DESCRIPCIÓN	HORAS	PRECIO/HORA	COSTE TOTAL
Becario	500	4,40 €	2.200 €
Eléctrico	20	30 €	600 €
Soldador	16	30 €	480 €
Mecánico	8	30 €	240 €
TOTAL			3.520 €

Tabla 9.2: Costes de mano de obra

COSTE TOTAL DE INVERSIÓN

El coste final del proyecto asciende a:

$$\text{Coste total} = 8.074\text{€} + 3.520 \text{ €} = \mathbf{11.594 \text{ €}}$$

**9.1.2 AHORROS**

Para calcular la amortización de los costes de inversión, se tendrá en cuenta en primer lugar el ahorro relacionado con la adquisición, afilado y recubrimiento de las fresas, en segundo lugar el ahorro relacionado con el cambio de herramienta, y por último el ahorro relacionado con el consumo de aceite.

Todos estos ahorros se producen como consecuencia del aumento obtenido en la vida de las fresas y por la reducción del consumo de aceite de corte al utilizar el sistema MQL.

En la siguiente tabla se muestra a modo de recordatorio, la producción anual de los 8 modelos de piezas que se mecanizan en la talladora de la célula 82.



TIPO DE PIEZA	PRODUCCIÓN
CE 18223	6.977
CE 20126	4.678
CE 19096	2.976
T 218796	466
T 218793	345
T 218794	106
T 218795	84
T 218791	68
<b>TOTAL</b>	<b>15.700</b>

**Tabla 9.3:** Volumen de producción anual de la talladora Liebherr LC-502

También es importante recordar los resultados obtenidos en el capítulo anterior, según los cuales al utilizar el sistema MQL se consigue un aumento en la vida de las fresas N-35-10-15381 y N-35-10-15305 de un 67%, mientras que en las fresas N-35-10-15444 y N-35-11-15333 se consigue un aumento del 33%.

	Vida de las fresas con aceite de corte (piezas)	Vida de las fresas con MQL (piezas)
<b>N-35-10-15381 y N-35-10-15305</b>	2310	3850
<b>N-35-10-15444 y N-35-11-15333</b>	2475	3300

**Tabla 9.4:** Vida de las fresas analizadas durante las pruebas

#### 9.1.2.1 AHORRO EN ADQUISICIÓN, AFILADO Y RECUBRIMIENTO DE LAS FRESAS

En primer lugar, se calcula el ahorro obtenido en las 4 fresas que se analizaron en el Capítulo 8. Posteriormente, a partir de los resultados obtenidos se realiza una estimación del ahorro que se podría conseguir en todas las fresas utilizadas en la talladora.

Todos estos ahorros se producen como consecuencia de que al utilizar el sistema MQL, las fresas pueden tallar mayor número de piezas entre afilados, consiguiendo por tanto un aumento en la vida de la herramienta.

**a) Ahorro en la fresa N-35-10-15381**

Coste de adquisición de una fresa: 666,46 €

Coste de afilado de una fresa: 105 €

Coste de recubrimiento de una fresa: 75 €

➤ Costes al tallar con aceite de corte afilando la fresa cada 3 shiftings (210 piezas)

Coste unitario de adquisición de la fresa con aceite de corte:

$$\frac{666,46\text{€}}{2310\text{piezas}} = 0,289\text{€/ pieza}$$

Coste unitario de afilado con aceite de corte:

$$\frac{180\text{€}}{\text{afilado}} \cdot \frac{10\text{afilados}}{2310\text{piezas}} = 0,779\text{€/ pieza}$$

Coste unitario de herramienta con aceite de corte:

$$C_{h(\text{aceite corte})} = 0,289\text{€/ pieza} + 0,779\text{€/ pieza} = 1,068\text{€/ pieza}$$

La producción de la pieza CE-18223 prevista para el año 2010 es de 6977 piezas, por lo que el coste anual de herramienta si se utiliza aceite de corte es de 7451,44 €.

$$C_{H(\text{aceite corte})} = 1,068\text{€/ pieza} \cdot 6977\text{ piezas / año} = 7451,44\text{€/ año}$$

➤ Costes al tallar con MQL afilando la fresa cada 5 shiftings (350 piezas)

Coste unitario de adquisición de la fresa con MQL:

$$\frac{666,46\text{€}}{3850\text{piezas}} = 0,173\text{€/ pieza}$$





Coste unitario de afilado con MQL:

$$\frac{180\text{€}}{\text{afilado}} \cdot \frac{10\text{afilados}}{3850\text{piezas}} = 0,467\text{€/ pieza}$$

Coste unitario de herramienta con MQL:

$$C_{h(\text{MQL})} = 0,173\text{€/ pieza} + 0,467\text{€/ pieza} = 0,64\text{€/ pieza}$$

Por lo tanto, el coste anual de herramienta al tallar con MQL las 6977 piezas previstas para todo el año 2010 será de 4465,28€.

$$C_{H(\text{MQL})} = 0,64\text{€/ pieza} \cdot 6977\text{ piezas / año} = 4465,28\text{€/ año}$$

Esto supone un ahorro anual de 2986,16 € respecto a tallar con aceite de corte con la frecuencia habitual de 210 piezas entre afilados (3 shiftings).

$$C_{H(\text{aceite corte})} - C_{H(\text{MQL})} = 7451,44\text{€/ año} - 4465,28\text{€/ año} = 2986,16\text{€/ año}$$

#### **b) Ahorro en la fresa N-35-10-15305**

Coste de adquisición de una fresa: 631,33 €

Coste de afilado de una fresa: 105 €

Coste de recubrimiento de una fresa: 75 €

#### **➤ Costes al tallar con aceite de corte afilando la fresa cada 3 shiftings (210 piezas)**

Coste unitario de adquisición de la fresa con aceite de corte:

$$\frac{631,33\text{€}}{2310\text{piezas}} = 0,273\text{€/ pieza}$$

Coste unitario de afilado con aceite de corte:



$$\frac{180\text{€}}{\text{afilado}} \cdot \frac{10\text{afilados}}{2310\text{piezas}} = 0,779\text{€/ pieza}$$

Coste unitario de herramienta con aceite de corte:

$$C_{h(\text{aceite corte})} = 0,273\text{€/ pieza} + 0,779\text{€/ pieza} = 1,052\text{€/ pieza}$$

Teniendo en cuenta que la previsión para el año 2010 es tallar 6977 piezas del modelo CE-18223, el coste anual de herramienta si se utiliza aceite de corte es de 7339,8 €.

$$C_{H(\text{aceite corte})} = 1,052\text{€/ pieza} \cdot 6977\text{ piezas / año} = 7339,8\text{€/ año}$$

➤ Costes al tallar con MQL afilando la fresa cada 5 shiftings (350 piezas)

Coste unitario de adquisición de la fresa con MQL:

$$\frac{631,33\text{€}}{3850\text{piezas}} = 0,164\text{€/ pieza}$$

Coste unitario de afilado con MQL:

$$\frac{180\text{€}}{\text{afilado}} \cdot \frac{10\text{afilados}}{3850\text{piezas}} = 0,468\text{€/ pieza}$$

Coste unitario de herramienta con MQL:

$$C_{h(\text{MQL})} = 0,164\text{€/ pieza} + 0,468\text{€/ pieza} = 0,632\text{€/ pieza}$$

Por lo tanto, el coste anual de herramienta al tallar con MQL las 6977 piezas previstas para todo el año 2010 será de 4409,46€.

$$C_{H(\text{MQL})} = 0,632\text{€/ pieza} \cdot 6977\text{ piezas / año} = 4409,46\text{€/ año}$$



Esto supone un ahorro anual de 2930,34 € respecto a tallar con aceite de corte con la frecuencia habitual de 210 piezas entre afilados (3 shiftings).

$$C_{H(\text{aceite corte})} - C_{H(\text{MQL})} = 7339,8\text{€/ año} - 4409,46\text{€/ año} = 2930,34\text{€/ año}$$

Según los cálculos realizados, tanto en la fresa N-35-10-15381 como en la N-35-10-15305, se pueden obtener importantes ahorros económicos si al utilizar el sistema MQL las fresas se afilan tras completar 5 shiftings, en lugar de afilarlas cada 3 shiftings que es la frecuencia habitual cuando se utiliza aceite de corte.

Sumando los ahorros obtenidos en estas dos fresas utilizadas para tallar la pieza CE-18223, se podrían reducir los costes anuales de herramienta en 5916,5€.

$$2986,16\text{€/ año} + 2930,34\text{€/ año} = 5916,5\text{€/ año}$$

Es importante recordar que la disminución en la frecuencia de afilado es posible gracias a que, según los resultados obtenidos en el capítulo anterior, el sistema MQL lubrica mejor la herramienta, reduciendo los desgastes en la superficie de incidencia y en la cara de corte de los dientes de las fresas madre.

### c) Ahorro en la fresa N-35-10-15444

Coste de adquisición de una fresa: 446,00 €

Coste de afilado de una fresa: 105 €

Coste de recubrimiento de una fresa: 75 €

#### ➤ Costes al tallar con aceite de corte afilando la fresa cada 3 shiftings (225 piezas)

Coste unitario de adquisición de la fresa con aceite de corte:

$$\frac{446,00\text{€}}{2475 \text{ piezas}} = 0,180\text{€/ pieza}$$



Coste unitario de afilado con aceite de corte:

$$\frac{180\text{€}}{\text{afilado}} \cdot \frac{10\text{afilados}}{2475\text{piezas}} = 0,727\text{€/ pieza}$$

Coste unitario de herramienta con aceite de corte:

$$C_{h(\text{aceite corte})} = 0,180\text{€/ pieza} + 0,727\text{€/ pieza} = 0,907\text{€/ pieza}$$

La producción de la pieza CE-20126 prevista para el año 2010 es de 4678 piezas, por lo que el coste anual de herramienta si se utiliza aceite de corte es de 4242,95 €.

$$C_{H(\text{aceite corte})} = 0,907\text{€/ pieza} \cdot 4678\text{piezas} / \text{año} = 4242,95\text{€/ año}$$

➤ Costes al tallar con MQL afilando la fresa cada 4 shiftings (300 piezas)

Coste unitario de adquisición de la fresa con MQL:

$$\frac{446,00\text{€}}{3300\text{piezas}} = 0,135\text{€/ pieza}$$

Coste unitario de afilado con MQL:

$$\frac{180\text{€}}{\text{afilado}} \cdot \frac{10\text{afilados}}{3300\text{piezas}} = 0,545\text{€/ pieza}$$

Coste unitario de herramienta con MQL:

$$C_{h(\text{MQL})} = 0,135\text{€/ pieza} + 0,545\text{€/ pieza} = 0,68\text{€/ pieza}$$

Por lo tanto, el coste anual de herramienta al tallar con MQL las 4678 piezas previstas para el año 2010 será de 3181,04 €.

$$C_{H(\text{MQL})} = 0,68\text{€/ pieza} \cdot 4678\text{piezas} / \text{año} = 3181,04\text{€/ año}$$



Esto supone un ahorro anual de 1060,91€ respecto a tallar con aceite de corte con la frecuencia habitual de 225 piezas entre afilados (3 shiftings).

$$C_{H(\text{aceite corte})} - C_{H(\text{MQL})} = 4242,95\text{€} / \text{año} - 3181,04\text{€} / \text{año} = 1060,91\text{€} / \text{año}$$

**d) Ahorro en la fresa N-35-11-15333**

Coste de adquisición de una fresa: 423,94 €

Coste de afilado de una fresa: 105 €

Coste de recubrimiento de una fresa: 75 €

➤ Costes al tallar con aceite de corte afilando la fresa cada 3 shiftings (225 piezas)

Coste unitario de adquisición de la fresa con aceite de corte:

$$\frac{423,94\text{€}}{2475 \text{ piezas}} = 0,171\text{€} / \text{pieza}$$

Coste unitario de afilado con aceite de corte:

$$\frac{180\text{€}}{\text{afilado}} \cdot \frac{10 \text{ afilados}}{2475 \text{ piezas}} = 0,727\text{€} / \text{pieza}$$

Coste unitario de herramienta con aceite de corte:

$$C_{h(\text{aceite corte})} = 0,171\text{€} / \text{pieza} + 0,727\text{€} / \text{pieza} = 0,898\text{€} / \text{pieza}$$

Teniendo en cuenta que la previsión para el año 2010 es tallar 4678 piezas del modelo CE-18223, el coste anual de herramienta si se utiliza aceite de corte es de 4200,84 €.

$$C_{H(\text{aceite corte})} = 0,898\text{€} / \text{pieza} \cdot 4678 \text{ piezas} / \text{año} = 4200,84\text{€} / \text{año}$$



➤ Costes al tallar con MQL afilando la fresa cada 4 shiftings (300 piezas)

Coste unitario de adquisición de la fresa con MQL:

$$\frac{423,94\text{€}}{3300\text{ piezas}} = 0,128\text{€/ pieza}$$

Coste unitario de afilado con MQL:

$$\frac{180\text{€}}{\text{afilado}} \cdot \frac{10\text{afilado}}{3300\text{ piezas}} = 0,545\text{€/ pieza}$$

Coste unitario de herramienta con MQL:

$$C_{h(MQL)} = 0,128\text{€/ pieza} + 0,545\text{€/ pieza} = 0,673\text{€/ pieza}$$

Por lo tanto, el coste anual de herramienta al tallar con MQL las 4678 piezas previstas para el año 2010 será de 3148,29 €.

$$C_{H(MQL)} = 0,673\text{€/ pieza} \cdot 4678\text{ piezas} / \text{año} = 3148,29\text{€/ año}$$

Esto supone un ahorro anual de 1052,55€ respecto a tallar con aceite de corte con la frecuencia habitual de 225 piezas entre afilados (3 shiftings).

$$C_{H(\text{aceite corte})} - C_{H(MQL)} = 4200,84\text{€/ año} - 3148,29\text{€/ año} = 1052,55\text{€/ año}$$

Según los cálculos realizados, tanto en la fresa N-35-10-15444 como en la N-35-11-15333, se pueden obtener beneficios económicos si al utilizar el sistema MQL las fresas se afilan cada 4 shiftings.

Sumando los ahorros obtenidos en estas dos fresas, utilizadas para tallar la pieza CE-20126, sería posible reducir los costes anuales de herramienta en 2113,46 €.

$$1060,91\text{€/ año} + 1052,55\text{€/ año} = 2113,46\text{€/ año}$$



En estas dos fresas se obtiene menor ahorro económico que con las dos fresas estudiadas anteriormente. Esto es debido a que al utilizar el sistema MQL, el aumento conseguido en la vida de las fresas N-35-10-15381 y N-35-10-15305 es mayor que en el caso de las fresas N-35-10-15444 y N-35-11-15333, pudiendo realizar 5 shiftings entre afilados en el primer caso y 4 en el segundo. Estos resultados también se deben a que la producción anual de la pieza CE-18223 es sensiblemente mayor que la producción anual de la pieza CE-20126.

Sumando los ahorros obtenidos en las 4 fresas que se analizaron, se obtiene un ahorro anual en herramienta de 8029,96 €.

	N-35-10-15381 y N-35-10-15305	N-35-10-15444 y N-35-11-15333	Total 4 fresas
Ahorro adquisición, afilado y recubrimiento	5916,5 €/año	2113,46 €/año	8029,96€/año

Tabla 9.5: Ahorro en herramienta obtenido en las 4 fresas madre analizadas

Todos estos cálculos han sido realizados con las cuatro fresas correspondientes a las piezas CE-20126 y CE-18223. Las pruebas se llevaron a cabo con estas dos piezas dado que eran las que tenían mayor producción prevista para el año 2010, sumando entre ambas un total de 11655 unidades, lo que equivale al 74,24% de la producción anual de la talladora (ver Tabla 9.3).

$$\frac{11655 \text{ piezas}}{15700 \text{ piezas}} \cdot 100 = 74,24\%$$

Pero en esta talladora se mecanizan otros seis tipos de piezas cuya producción anual suma 4045 piezas, es decir, el 25,76% de la producción total.

$$\frac{4045 \text{ piezas}}{15700 \text{ piezas}} \cdot 100 = 25,76\%$$

Dada la imposibilidad de realizar las mismas pruebas con todas las piezas y sus correspondientes fresas madre, a continuación se realiza una estimación suponiendo que los ahorros que se pueden obtener en el resto de fresas, son proporcionales a los ahorros obtenidos en las cuatro fresas analizadas.





De esta manera, teniendo en cuenta todas las fresas que se utilizan en la talladora Liebherr LC-502, podría obtenerse un ahorro anual de 10.816,22 €.

$$\text{Ahorro fresas} = \frac{8029,96\text{€/año}}{74,24} \cdot 100 = 10.816,22\text{€/año}$$

Es necesario destacar que aunque únicamente se analizó el desgaste de las cuatro fresas ya comentadas, la talladora sí trabaja con el sistema MQL con el resto de fresas sin observar ningún efecto anómalo.

Además entre las cuatro fresas analizadas, se encuentran las que mayor y menor módulo presentan de todas cuantas trabajan en la talladora, por lo que es previsible que esta estimación se aproxime bastante a la realidad.

#### 9.1.2.2 AHORRO EN EL CAMBIO DE HERRAMIENTA

Cuando una fresa es enviada a afilar es necesario realizar un cambio de herramienta en la talladora. En el caso de la talladora Liebherr LC-502 el cambio de herramienta incluye la sustitución de las dos fresas con las que se ha trabajado.

Al disminuir la frecuencia de afilado de las fresas, el número de cambios de herramienta que realiza el operario de la célula también disminuye.

##### ➤ Fresas N-35-10-15381 y N-35-10-15305

Tal y como se mencionó en los anteriores apartados, estas fresas se utilizan para tallar la pieza CE-18223, cuya producción anual es de 6977 unidades. Cuando se utiliza aceite de corte, el cambio de estas fresas se realiza cada 210 piezas, por lo que al año se llevan a cabo 33,22 cambios de herramienta.

$$\frac{6977 \text{ piezas/año}}{210 \text{ piezas/cambio herramienta}} = 33,22 \text{ cambios herramienta/año}$$

Al trabajar con MQL es posible realizar el cambio de fresas cada 350 piezas, por lo que se realizaría un total de 19,93 cambios al año.



$$\frac{6977 \text{ piezas/año}}{350 \text{ piezas/cambio herramienta}} = 19,93 \text{ cambios herramienta/año}$$

De esta manera se conseguirían ahorrar 13,29 cambios de herramienta anuales.

$$33,22 - 19,93 = 13,29 \text{ cambios herramienta/año}$$

Un cambio de herramienta está estipulado en 1,18 horas estándar, y el coste de una hora estándar es de 30 €. Por lo tanto, en estas dos fresas se obtendría un ahorro anual de 470,47 €.

$$13,29 \frac{\text{cambios herramienta}}{\text{año}} \cdot 1,18 \frac{\text{hora estándar}}{\text{cambio herramienta}} \cdot 30 \frac{\text{€}}{\text{hora estándar}} = 470,47 \text{ €/año}$$

➤ Fresas N-35-10-15444 y N-35-11-15333

Tal y como se mencionó en los anteriores apartados, estas fresas se utilizan para tallar la pieza CE-20126, cuya producción anual es de 4678 unidades. Cuando se utiliza aceite de corte, el cambio de estas fresas madre se realiza cada 225 piezas, por lo que al año se llevan a cabo 20,79 cambios de herramienta.

$$\frac{4678 \text{ piezas/año}}{225 \text{ piezas/cambio herramienta}} = 20,79 \text{ cambios herramienta/año}$$

Al trabajar con MQL es posible realizar el cambio de fresas cada 300 piezas, siendo necesarios de esta manera 15,59 cambios al año.

$$\frac{4678 \text{ piezas/año}}{300 \text{ piezas/cambio herramienta}} = 15,59 \text{ cambios herramienta/año}$$

De esta forma se conseguiría ahorrar 5,2 cambios de herramienta anuales.



$$20,79 - 15,59 = 5,2 \text{ cambios herramienta/año}$$

Como el cambio de herramienta está estipulado en 1,18 horas estándar, y el coste de una hora estándar es de 30 €, se obtendría un ahorro anual en estas dos fresas de 184,08 €.

$$5,2 \frac{\text{cambios herramienta}}{\text{año}} \cdot 1,18 \frac{\text{hora estándar}}{\text{cambio herramienta}} \cdot 30 \frac{\text{€}}{\text{hora estándar}} = 184,08 \text{ €/año}$$

Sumando los resultados obtenidos en el cambio de herramienta de estas 4 fresas se obtiene un ahorro anual de 654,55 €.

	N-35-10-15381 y N-35-10-15305	N-35-10-15444 y N-35-11-15333	Total 4 fresas
<b>Ahorro cambio herramienta</b>	470,47 €/año	184,08 €/año	654,55€/año

**Tabla 9.6:** Ahorro obtenido en el cambio de herramienta de las 4 fresas madre analizadas

Si se realiza la misma estimación que en el anterior apartado, teniendo en cuenta los cambios de herramienta de todas las fresas que se utilizan en la talladora Liebherr LC-502, podría obtenerse un ahorro anual de 881,67 €/año.

$$\text{Ahorro cambio herramienta} = \frac{654,55 \text{ €/año}}{74,24} \cdot 100 = 881,67 \text{ €/año}$$

### 9.1.2.3 AHORRO DE ACEITE

Al utilizar el sistema MQL se producen beneficios económicos y medioambientales como consecuencia de la reducción de aceite en el proceso de mecanizado.

Aunque debido al diseño de la talladora no fue posible eliminar el aceite de corte, se estima que su consumo se redujo en un 70% al utilizar el sistema MQL.



El consumo de aceite de corte de esta talladora es de unos 900 litros/año (el equivalente a 3 depósitos). Este aceite, cuya densidad es de 0,93 kg/l, tiene un precio de 1,95 €/kg por lo que el coste anual de tallar con aceite de corte asciende a 1632,15 €.

$$C_{\text{aceite corte}} = \frac{900l}{\text{año}} \cdot \frac{0,93kg}{l} \cdot \frac{1,95€}{kg} = 1632,15€/ \text{año}$$

Dado que al utilizar el sistema MQL el aceite de corte únicamente se utiliza para la evacuación de viruta, su consumo se reduce en un 70%, por lo que el coste anual de aceite de corte es de 489,65€/año.

$$C_{\text{aceite corte(MQL)}} = 0,3 \cdot \frac{900l}{\text{año}} \cdot \frac{0,93kg}{l} \cdot \frac{1,95€}{kg} = 489,65€/ \text{año}$$

Pero al utilizar el sistema MQL, al coste del aceite de corte hay que añadir el coste del aceite del propio MQL. Teniendo en cuenta que el tiempo medio del ciclo de tallado en todas las piezas es de 6 minutos y que el caudal que emite este dispositivo es de 100 ml/h, el consumo unitario de este aceite es de 10 ml/pieza.

$$\frac{100ml}{1h} \cdot \frac{1h}{60 \text{ min}} \cdot \frac{6 \text{ min}}{1 \text{ pieza}} = 10ml / \text{pieza}$$

Dado que la talladora tiene una producción anual de 15700 piezas, el MQL consume 157 litros de aceite al año.

$$\frac{10ml}{\text{pieza}} \cdot \frac{1l}{1000ml} \cdot \frac{15700 \text{ piezas}}{\text{año}} = 157l / \text{año}$$

Este aceite tiene una densidad de 0,92 kg/l y un precio de 6,91 €/kg, por lo que el coste anual es de 998,08 €/año.

$$C_{\text{aceite MQL}} = \frac{157l}{\text{año}} \cdot \frac{6,91€}{1kg} \cdot \frac{0,92kg}{1l} = 998,08€/ \text{año}$$



Sumando los costes relacionados con estos dos aceite, el coste anual de tallar con el sistema MQL asciende a 1487,73 €.

$$C_{\text{aceite corte(MQL)}} + C_{\text{aceite MQL}} = 489,65\text{€/año} + 998,08\text{€/año} = 1487,73\text{€/año}$$

Por lo tanto, en caso de utilizar el sistema MQL se conseguiría un ahorro anual en aceite de 144,42 €.

$$\text{Ahorro aceite} = 1632,15\text{€/año} - 1487,73\text{€/año} = 144,42\text{€/año}$$

Este ahorro es mucho menor que los ahorros relacionado con la adquisición, afilado y cambio de herramienta. La explicación reside en el elevado precio del aceite que utiliza el sistema MQL, ya al tratarse de un aceite con características especiales y dado que se compra en pequeñas cantidades, su precio es varias veces superior al precio del aceite de corte convencional.

Por este motivo, pese a disminuir en gran medida la cantidad de aceite utilizado en el proceso de tallado, al trabajar con el sistema MQL los costes relacionados con el lubricante son prácticamente iguales que al trabajar con aceite de corte.

#### 9.1.2.4 AHORRO TOTAL

Sumando todos los ahorros calculados en los anteriores apartados, se obtiene un ahorro anual total de 11.842,31€.

Ahorro adquisición, afilado y recubrimiento de fresas	10.816,22 €/año
Ahorro cambio herramienta	881,67 €/año
Ahorro en aceite	144,42 €/año
<b>Ahorro total</b>	<b>11.842,31 €/año</b>

Tabla 9.7: Ahorro total obtenido en las 4 fresas madre analizadas



### 9.1.3 AMORTIZACIÓN DEL CAPITAL

Definidos los ahorros por año, el capital invertido será amortizado según la expresión:

$$A = \frac{I}{T_o}$$

Siendo:

A = Amortización del capital (€/año).

$T_o$  = Tiempo en el que se pretende amortizar la inversión (años).

I = Inversión inicial (€).

De esta manera se obtiene un tiempo de amortización de 0,98 años.

$$T_a = \frac{I}{A} = \frac{11.594 \text{ €}}{11.842,31 \text{ €/año}} = 0,98 \text{ años}$$

Por lo que tan solo en el primer año se podría amortizar la totalidad de la inversión realizada.

### 9.1.4 AHORROS EN AMPLIACIÓN DE PROYECTO

Este proyecto se llevó a cabo en la talladora considerada como el caso más desfavorable de todas cuantas hay en John Deere Ibérica S.A. Por este motivo resulta interesante estimar los resultados de ampliar este proyecto a otras talladoras.

A continuación se muestran cuales podrían ser los ahorros obtenidos si se implantase el sistema MQL en una talladora de alta producción. En concreto se seleccionó la talladora Liebherr LC-582 ubicada en la célula 218.

Esta talladora mecaniza un único modelo de pieza cuya producción anual es de 28.000 unidades. Para ello utiliza una fresa madre de metal duro que tiene una



frecuencia de afilado de 66 piezas. Como se realizan 20 afilados antes de que sea desechada, la vida de esta fresa es de 1386 piezas.

Esta herramienta tiene un módulo de 5,72 milímetros, similar al módulo de la fresa N-35-10-15381 que fue analizada en el capítulo anterior, y en la cual se obtuvo un aumento de vida de un 67 %.

Por lo tanto, cabe esperar que al utilizar el sistema MQL en esta fresa se consiga al menos un aumento de vida de un 50 %. De esta manera, la frecuencia de afilado sería de 99 piezas y la vida de la herramienta de 2079 unidades. Esta es la hipótesis en la que se basan los siguientes cálculos.

El coste de adquisición de esta fresa es de 4795,4 €, mientras que el coste de afilado y recubrimiento es de 210 €.

- AHORRO EN ADQUISICIÓN, AFILADO Y RECUBRIMIENTO DE LA FRESA

➤ Costes al tallar con aceite de corte afilando la fresa cada 66 piezas

Coste unitario de adquisición de la fresa con aceite de corte:

$$\frac{4795,4\text{€}}{1386\text{piezas}} = 3,46\text{€/ pieza}$$

Coste unitario de afilado con aceite de corte:

$$\frac{210\text{€}}{\text{afilado}} \cdot \frac{20\text{afilados}}{1386\text{piezas}} = 3,03\text{€/ pieza}$$

Coste unitario de herramienta con aceite de corte:

$$C_{h(\text{aceite corte})} = 3,46\text{€/ pieza} + 3,03\text{€/ pieza} = 6,49\text{€/ pieza}$$

El coste anual de herramienta tallando con aceite de corte es de 181.720 €.

$$C_{H(\text{aceite corte})} = 6,49\text{€/ pieza} \cdot 28.000\text{piezas / año} = 181.720\text{€/ año}$$





➤ Costes al tallar con MQL afilando la fresa cada 99 piezas

Coste unitario de adquisición de la fresa con MQL:

$$\frac{4795,4\text{€}}{2079\text{ piezas}} = 2,31\text{€/ pieza}$$

Coste unitario de afilado con MQL:

$$\frac{210\text{€}}{\text{afilado}} \cdot \frac{20\text{afilados}}{2079\text{ piezas}} = 2,02\text{€/ pieza}$$

Coste unitario de herramienta con MQL:

$$C_{h(MQL)} = 2,31\text{€/ pieza} + 2,02\text{€/ pieza} = 4,33\text{€/ pieza}$$

El coste anual de herramienta tallando con MQL sería por lo tanto de 121.240 €.

$$C_{H(MQL)} = 4,33\text{€/ pieza} \cdot 28000\text{ piezas / año} = 121.240\text{€/ año}$$

De esta manera se obtendría un ahorro anual en herramienta de 60.480 €.

$$\text{Ahorro fresas} = 181.720 \text{ €/año} - 121.240 \text{ €/año} = 60.480 \text{ €/año}$$

- AHORRO EN EL CAMBIO DE HERRAMIENTA

Cuando se utiliza aceite de corte, el cambio de esta fresa se realiza cada 66 piezas, por lo que al año se llevan a cabo 424,24 cambios de herramienta.

$$\frac{28.000\text{ piezas/año}}{66\text{ piezas/cambio herramienta}} = 424,24\text{ cambios herramienta/año}$$

Si al trabajar con MQL fuese posible realizar el cambio de fresas cada 99 piezas, habría que realizar 282,83 cambios al año.



$$\frac{28.000 \text{ piezas/año}}{99 \text{ piezas/cambio herramienta}} = 282,83 \text{ cambios herramienta/año}$$

De esta manera ahorrarían 141 cambios de herramienta anuales.

$$424,24 - 282,83 = 141,41 \text{ cambios herramienta/año}$$

En esta máquina, un cambio de herramienta (ch) está estipulado en 1,7 horas estándar (hrs std), y el coste de una hora estándar es de 30 €. Por lo tanto, se conseguiría un ahorro anual en cambio de herramienta de 7.191 €.

$$\text{Ahorro cambio herramienta} = 141 \frac{\text{ch}}{\text{año}} \cdot 1,7 \frac{\text{hrs std}}{\text{ch}} \cdot 30 \frac{\text{€}}{\text{hrs std}} = 7.191 \text{ €/año}$$

- AHORRO TOTAL

Despreciando los ahorros relacionados con el aceite de corte, se obtendría un ahorro anual total de 67.671 €.

$$\text{Ahorro total} = 60.480 \text{ €/año} + 7.191 \text{ €/año} = \mathbf{67.671 \text{ €/año}}$$

Es necesario recordar que estos ahorros se podrían obtener como consecuencia de implantar un sistema MQL, en una de las diversas talladoras de alta producción de las que dispone John Deere Ibérica S.A.



### 9.1.5 RESUMEN

A continuación se muestra una tabla resumen de los resultados obtenidos en este estudio económico.

COSTE EQUIPOS (€)	8.074,00
COSTE MANO DE OBRA (€)	3.520,00
<b>COSTE TOTAL INVERSIÓN (€)</b>	<b>11.594,00</b>
AHORRO HERRAMIENTA (€/año)	10.816,22
AHORRO CAMBIO HERRAMIENTA (€/año)	881,67
AHORRO ACEITE (€/año)	144,42
<b>AHORRO TOTAL (€/año)</b>	<b>11.842,31</b>
<b>AMORTIZACIÓN (años)</b>	<b>0,98</b>
<b>AHORRO AMPLIACIÓN PROYECTO (€/año)</b>	<b>67.671,00</b>

Tabla 9.8: Tabla resumen del estudio económico



## 9.2 CONCLUSIONES

El objetivo de este proyecto consiste en optimizar el proceso de tallado por generación mediante un sistema de lubricación por cantidades mínimas.

Es importante destacar que aunque estos sistemas de lubricación son muy utilizados en diversos procesos de mecanizado, con anterioridad a este proyecto no se conocía ninguna aplicación de sistemas MQL en el proceso de tallado por generación, por lo que se trata de un proyecto totalmente innovador.

Para llevarlo a cabo, se instaló un dispositivo MQL externo en la talladora de la célula 82, ubicada en la Minifábrica de Ejes y Engranajes de John Deere Ibérica S.A.

Esta talladora fue seleccionada para realizar estas pruebas por ser considerada el caso más desfavorable de entre todas las talladoras existentes en la factoría, ya que utiliza fresas de acero rápido y trabaja a una velocidad de corte limitada a unos 100 m/min. Además en esta máquina se mecanizan diversos modelos de piezas, en los que se tallan desde finos estriados hasta dentados con módulos superiores a 5 milímetros.

De esta forma si la implantación del sistema MQL resultaba exitosa en esta talladora, también lo podría ser en el resto de máquinas similares de la factoría.

Uno de los objetivos buscados inicialmente consistía en reducir el consumo de aceite de corte. Aunque no fue posible eliminarlo por completo debido a que el diseño de la máquina hacía necesario su uso para la evacuación de la viruta, su consumo se redujo en un 70 %.

Durante las numerosas pruebas realizadas se comprobó que al tallar con el sistema MQL, las piezas estaban más limpias a la salida de la talladora y además se reducían las salpicaduras de aceite, por lo que se contribuía a mantener limpia la zona de trabajo.

En consecuencia, este sistema es más respetuoso con el medio ambiente que los sistemas de lubricación convencionales, y además permite reducir en gran medida los costes relacionados con el fluido de corte.



Sin embargo, el mayor beneficio económico obtenido con este sistema de lubricación por cantidades mínimas está relacionado con la disminución de los desgastes producidos en las herramientas.

Durante las pruebas realizadas, se observó que al tallar con el sistema MQL se reducía tanto el desgaste abrasivo producido en la superficie de incidencia, como el desgaste de cráter producido en la superficie de desprendimiento de los dientes de las fresas madre.

Estos resultados, que fueron observados en todas las fresas con las que se trabajó en este proyecto, se deben al pequeño tamaño de las partículas de lubricante que alcanzan puntos difícilmente accesibles para el aceite de corte convencional. De esta manera se reduce el rozamiento entre las superficies de incidencia y la pieza a mecanizar, así como el rozamiento entre la superficie de desprendimiento y la viruta.

Durante las pruebas llevadas a cabo en este proyecto se consiguió aumentar la vida de algunas fresas en más de un 60%, por lo que se pueden obtener importantes beneficios económicos relacionados con la adquisición, afilado y recubrimiento de las fresas, así como reducir el tiempo de cambio de herramienta.

Otro hecho destacable observado al tallar con el sistema MQL es que los mejores resultados se obtuvieron con los módulos más grandes, es decir, cuanto mayor es el tamaño de la viruta arrancada, mayor es el aumento obtenido en la vida de la herramienta.

No obstante todas estas pruebas se realizaron con fresas de acero rápido a una velocidad de corte de unos 90 m/min. Por esta razón sería muy interesante probar este sistema de lubricación en talladoras que trabajen a alta velocidad de corte, las cuales utilizan fresas de metal duro, ya que según diversas investigaciones realizadas en este ámbito, los mejores resultados con el sistema MQL se obtienen a altas velocidades de corte.

Este efecto es debido a que las pequeñas partículas de aceite que emite el sistema de lubricación por cantidades mínimas (cuyo diámetro es inferior a 1  $\mu\text{m}$ ), apenas tienen inercia y velocidad de caída. Esto hace posible el transporte del aerosol sin que se produzca una notable separación de la mezcla aire-aceite, de



forma que todas las partículas de lubricante se pueden aplicar sobre el filo de corte de la herramienta independientemente de su velocidad de giro.

En esta línea sería posible trabajar a mayores velocidades de corte y con mayores avances sin que repercutiera en un mayor desgaste de las fresas. De esta forma, sería posible optimizar los parámetros de corte logrando un aumento de la producción.

John Deere Ibérica S.A. dispone de diferentes talladoras de ejes y engranajes, por lo que sería posible realizar una ampliación de este proyecto, obteniendo así un importante ahorro en herramientas, además de contribuir a mejorar la atmósfera de trabajo de la fábrica.



## *BIBLIOGRAFÍA*





## BIBLIOGRAFÍA

### LIBROS

- Giafranco Bianco: "*Gear Hobbing*" (Novaprint, 2004)
- Darle W. Dudley: "*Manual de engranajes*" (C.E.C.S.A., 1983)

### CONGRESOS

- *XIV Congreso de Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación* (San Sebastián, 2002)
- *Cylindrical Gear Processing Seminar* (1999)

### ARTÍCULOS DE REVISTAS

- Matsuoka H., Tsuda Y., Suda S., Yokota H.: "*Fundamental Research on Hobbing with Minimal Quantity Lubrication of Cutting Oil (Effect of Cutting Speed)*", JSME International Journal, Vol. 49, pp.1140-1150 (2006)
- Matsuoka H., Suda S., Yokota H., Tsuda Y.: "*Fundamental Research on Hobbing with Minimal Quantity Lubrication of Cutting Oil (Effect of Quantity Oil Supply)*", JSME International Journal, Vol. 49, pp.590-599 (2006)

### PROYECTOS FIN DE CARRERA

- García Sanabria, Rubén: "*Automatización de la célula 149 de mecanizado de engranajes en John Deere Ibérica, S.A.*". Universidad Carlos III de Madrid, 2004
- Gómez Preciado, Iban: "*Sistema de vigilancia y diagnosis en máquina herramienta mediante análisis de vibraciones. Optimización del cambio de herramienta de corte*". Universidad Politécnica de Madrid, 2009
- Monterrubio Álvarez, Luis Ángel: "*Estudio técnico y económico para la optimización del proceso de taladrado en acero F-1140 mediante el análisis*"



*geométrico de la broca y la utilización de técnicas MQL*". Universidad Pontificia Comillas de Madrid, 2008

### **DOCUMENTOS ELECTRÓNICOS EN LA RED**

- <http://www.deere.com/>
- <http://www.jsme.or.jp/English/>

### **DOCUMENTACIÓN TÉCNICA**

- Talladora Liebherr LC-502
- Equipo Lubrilean Basic, Vogel
- Filtro Donaldson Dryflo DMC-MMC



## *ANEXO A*



## ANEXO A

En este documento se encuentran recogidos los diferentes bloques de programación del PLC de la talladora Liebherr LC-502, que fueron modificados para que el sistema MQL y el filtro de niebla de aceite funcionasen de forma adecuada.

La programación de estos bloques está realizada en el lenguaje utilizado por el autómatas Simatic S7 de Siemens, en el que las entradas y salidas de dicho autómatas se identifican por un código alfanumérico. Así, de forma general se puede distinguir entre:

E: entrada

A: salida

M: marca (salida para secuencia interna del programa)

A continuación se muestran los segmentos de los bloques FC113 y FC139 que fueron modificados, comentando brevemente su función:

### BLOQUE FC113

```
FC113 - <offline>
"FE_13" LIQUIDO REFRIG. Y TRNASPORTE DE VIRUTAS
Nombre: EXTR-REF Familia:
Autor: Versión: 0.1
Versión del bloque: 2
Hora y fecha Código: 03/02/2010 15:29:46
Interface: 30/04/2008 08:28:15
Longitud (bloque / código / datos): 00466 00348 00002
```

Propiedades del objeto:  
S7\_language 9(1) Inglés (Estados Unidos) 26/08/2008 12:18:29

Nombre	Tipo de datos	Dirección	Comentario
IN		0.0	
OUT		0.0	
IN_OUT		0.0	
TEMP		0.0	
RETURN		0.0	
RET_VAL		0.0	

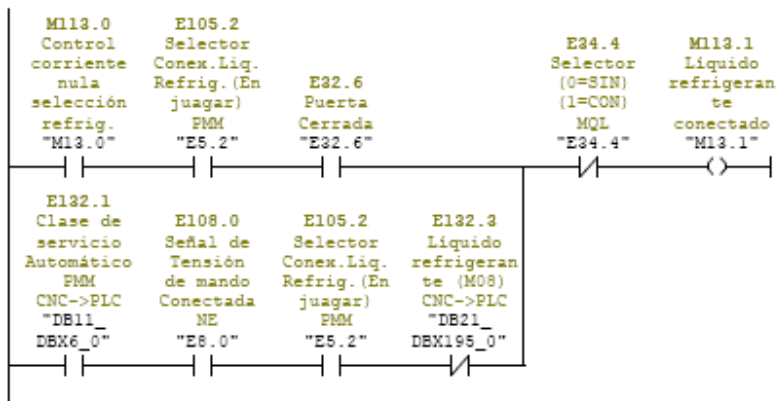
Bloque: FC113

.

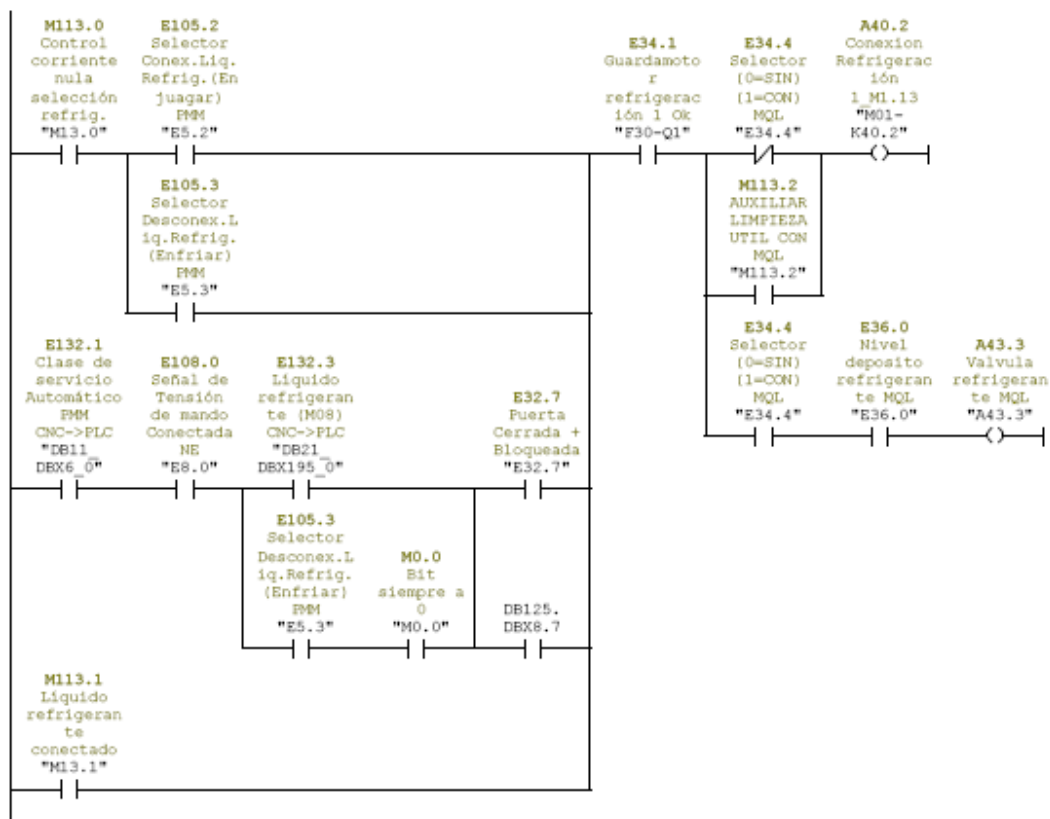
.

.

Segm.: 2	Líquido refrigerante conectado
Este refrigerante se refiere al del enjuague del utillaje	



Segm.: 5	Transporte virutas conectado
<p>añado el guardamotor del motor M1.4  y por "soft" activamos el M1.101 que antes se hacia por "hard" (11K53.1)</p>	





Segm.: 12      Marcha extractor exterior de humos DONALDSON

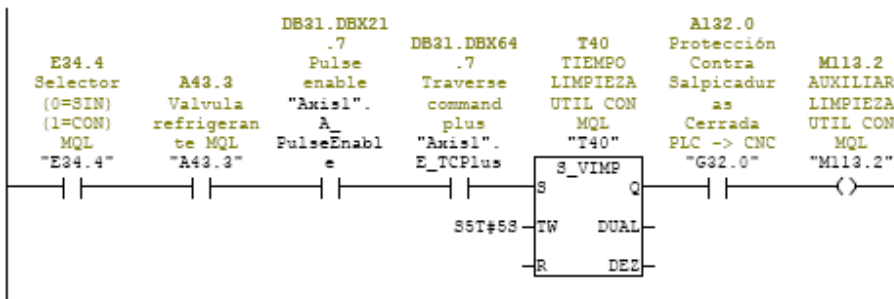
Se pone en marcha cuando arranca el programa de mecanizado y se para transcurrido el tiempo despues de estar parado el programa



Segm.: 13      Reserva



Segm.: 14      RET.F.BLQ.ENGRASE 1A



En los Segmentos 2, 5 y 14 de este bloque, se muestra la secuencia lógica seguida por el PLC de la talladora para trabajar con aceite de corte o con MQL.

Al Segmento 2 únicamente se le añadió la entrada E34.4 (selector MQL) desactivada, es decir, en la posición de aceite de corte. La finalidad de este segmento es obtener la salida interna M13.1 (líquido refrigerante conectado) que es utilizada en el Segmento 5 del mismo bloque.



Debido a los problemas generados por la viruta, fue necesario programar el Segmento 14 de forma que cuando se trabajase con MQL (selector MQL E34.4 y electroválvula MQL A43.3 activados), y a la vez retrocediese el eje X de la talladora, se activara durante 5 segundos (temporizador T40) el aceite de corte para facilitar la evacuación de la viruta acumulada. La finalidad de este segmento es obtener la salida interna M113.2 (auxiliar limpieza útil con MQL) que se utiliza en el Segmento 5 del mismo bloque.

En el Segmento 5 es donde realmente se realiza la selección entre aceite de corte o MQL. Únicamente fue necesario modificar la parte final de este segmento, de forma que antes de modificar el programa, tras la entrada E34.1 (guardamotor) únicamente estaba programada la salida A40.2 correspondiente al aceite de corte.

La programación se realizó de forma que para trabajar con aceite de corte, o bien la entrada E34.4 (selector MQL) estuviese desactivada, o bien la salida interna M113.2 (auxiliar limpieza útil con MQL) estuviese activada. De esta manera, únicamente se puede activar la bomba del aceite de corte si el selector instalado en el control numérico está en la posición de aceite de corte, o si este selector está en la posición de MQL pero el carro portafresas (eje X) está retrocediendo.

Para trabajar con MQL es necesario que la entrada E34.4 (selector MQL) y la entrada E36.0 (nivel mínimo MQL) estén activados, es decir, que para que la electroválvula del sistema MQL (salida A43.3) se active tiene que estar el selector en la posición de MQL y además el nivel de aceite del depósito del MQL tiene que estar por encima del sensor de nivel mínimo.

En los Segmentos 12 y 13 de este bloque se pueden observar las secuencias seguidas para que el filtro (extractor de humos Donaldson) comience a funcionar (salida A43.2) al iniciar un ciclo, es decir, cuando el Canal 1 está activo, y que deje de funcionar transcurridos 3 minutos desde el final de dicho ciclo (retardo desconexión T78).

**BLOQUE FC139****FC139 - <offline>**

"ALARMAS\_NUEVAS"

Nombre: Familia:  
Autor: Versión: 0.1  
Versión del bloque: 2  
Hora y fecha Código: 14/01/2010 8:46:11  
Interface: 19/08/2008 13:07:24  
Longitud (bloque / código / datos): 01050 00864 00000

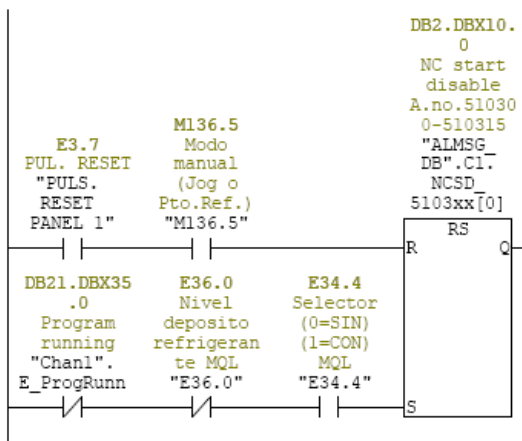
**Propiedades del objeto:**

S7\_language 9(1) Inglés (Estados Unidos) 26.08.2008 12:18:39

Nombre	Tipo de datos	Dirección	Comentario
IN		0.0	
OUT		0.0	
IN_OUT		0.0	
TEMP		0.0	
RETURN		0.0	
RET_VAL		0.0	

.  
.  
.

Segm.: 48 Alarm 510300 nivel bajo deposito refrigerante MQL



En este bloque se encuentran recogidas todas las alarmas de la talladora. Únicamente fue necesario añadir el Segmento 48 correspondiente al nivel bajo del depósito de aceite del MQL.

Este segmento se programó de forma que cuando estuviese activada la entrada E34.4 (selector MQL) pero la entrada E36.0 (sensor de nivel mínimo) estuviese desactivada, apareciera una alarma en el control numérico de la talladora.





Esta alarma se programó para que permitiese finalizar el ciclo de la pieza que estuviese tallando, pero que impidiese iniciar el siguiente ciclo. Por ello, en serie con las entradas E34.4 y E36.0 aparece el Canal 1 desactivado, provocando que la alarma aparezca al finalizar ciclo. De esta manera, para poder seguir tallando con MQL sería necesario rellenar el aceite del MQL y pulsar el reset del control numérico en modo manual.

El sensor de nivel mínimo (entrada E36.0), se programó de manera que está desactivado si el nivel de aceite está por debajo y se activa cuando el aceite supera dicho sensor. La programación se realizó de esta forma para asegurarse que en caso de desconexión de este sensor, se activase la alarma impidiendo así tallar más piezas con MQL.



## *ANEXO B*



## ANEXO B

En el presente documento se muestran las principales características técnicas y de funcionamiento del filtro de niebla de aceite Donaldson Dryflo DMC-MMC.

### Filtración:

El filtro está constituido por un sistema de filtración de tres etapas.

- Filtración primera etapa: Formada por un filtro metálico.
- Filtración segunda etapa: Constituida por un envoltorio multicapa (3 capas de materiales filtrantes).
- Filtración tercera etapa: Compuesta por un cartucho filtrante de alta eficiencia con una superficie total de 13 m<sup>2</sup>.

### Funcionamiento:

El aire cargado de aceite sigue una dirección ascendente en el equipo. Las partículas más gruesas son bloqueadas en la primera etapa de filtración; el aire pasa a través de la segunda y tercera etapa de filtración, reteniendo partículas más finas, las cuales por aglomeración entre sí, forman pequeñas gotas que se deslizan sobre la capa protectora del cartucho y caen por gravedad. El aire depurado a su paso a través del cartucho es finalmente extraído por el ventilador.

### Control de pérdida de carga:

La unidad está provista de un manómetro diferencial. A medida que el cartucho se va cargando, la pérdida de carga va creciendo y el manómetro indica la necesidad de cambiar el cartucho filtrante.

### Grupo motor ventilador:

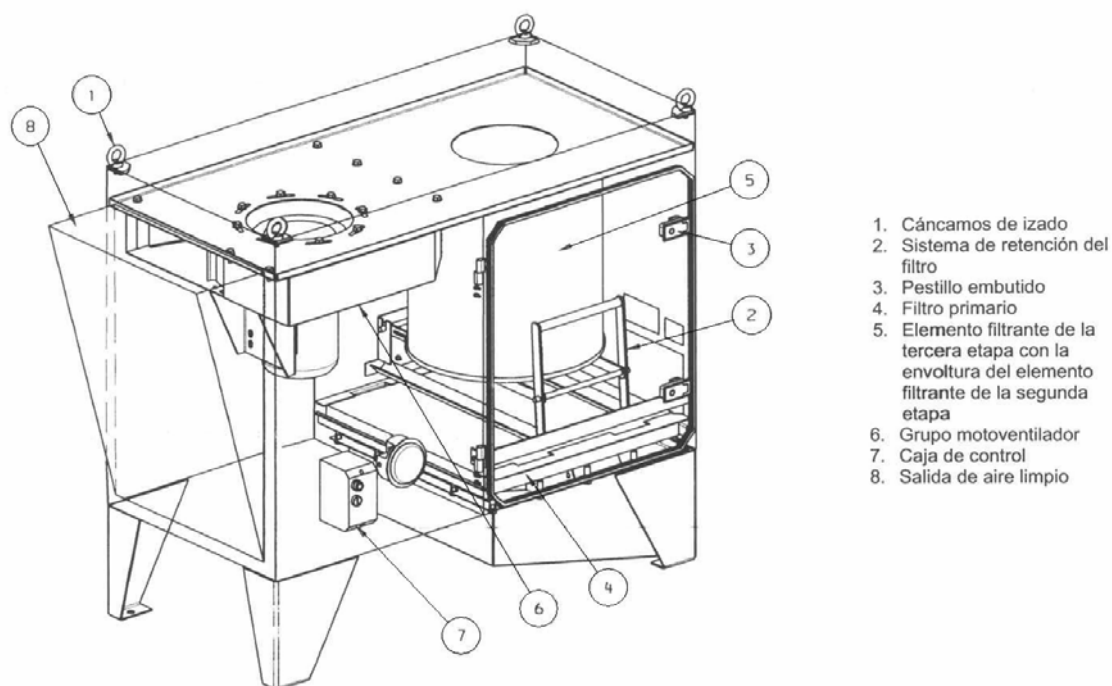
- Caudal nominal de aire: 2200 m<sup>3</sup>/h.
- Caudal con cartuchos colmatados: 1600 m<sup>3</sup>/h.
- Motor: 1,5 Kw, III 440V, 50 Hz.

### Nivel sonoro:

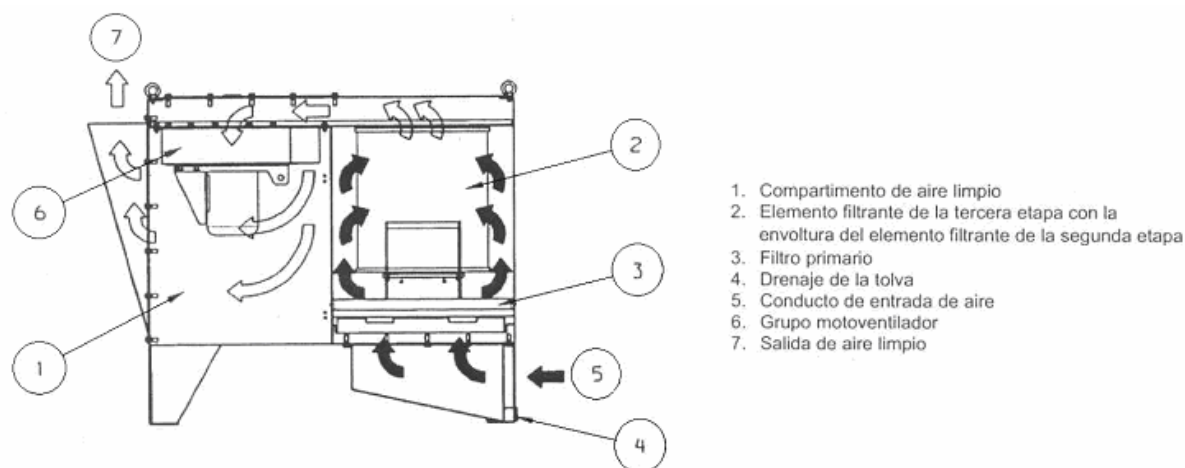
LpAeq 72 dB(A) a 1 metro de campo libre.

### Peso aproximado:

197 Kg



**Figura B.1:** Esquema del filtro Donaldson Dryflo DMC-MMC



**Figura B.2:** Esquema de funcionamiento del filtro Donaldson Dryflo DMC-MMC